



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΕ
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ: Η ΑΞΙΑ ΤΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ
ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

Παντελής Γ. Σιδηρόπουλος

Διδακτορική Διατριβή που υποβλήθηκε στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Βόλος, Νοέμβριος 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή είναι το αποτέλεσμα μιας μακροχρόνιας ερευνητικής προσπάθειας μιας και αποτελεί συνέχεια και εξέλιξη τόσο της μεταπτυχιακής μου διατριβής, όσο και της διπλωματικής μου εργασίας. Έτσι λοιπόν, η ερευνητική μου ενασχόληση με τη Κάρλα και δη με τον υπόγειο υδροφορέα αυτής ξεκινά από το 2003, αλλά δεν κλείνει με την εν λόγω διατριβή. Η πορεία αυτή συνεχίζεται τόσο σε ερευνητικό επίπεδο, μέσω των ερευνητικών προγραμμάτων στα οποία συμμετέχω, όσο και μέσω της υπαλληλικής μου ιδιότητας στο Φορέα Διαχείρισης Περιοχής Οικοανάπτυξης Κα.Μα.Κε.Βε. Είναι λοιπόν η Κάρλα, κάτι παραπάνω από μια ερευνητική και εργασιακή ασχολία. Είναι πλέον κομμάτι του εαυτού μου. Νιώθω από τους τυχερούς νέους επιστήμονες, γιατί ότι εφόδια μου έδωσε απλόχερα το ελληνικό δημόσιο Πανεπιστήμιο τα εφάρμοσα και εφαρμόζω καθημερινά στην εργασία μου στο Φορέα της Κάρλας.

Η διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας από το καλοκαίρι του 2007 έως το φθινόπωρο του 2014. Εμπνευστής της ιδέας για την ερευνητική μου ενασχόληση με τον υπόγειο υδροφορέα της Κάρλας είναι ο επιβλέπων καθηγητής μου κ. Νικήτας Μυλόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Π.Θ, ο οποίος επιτέλεσε επιβλέπων και στη μεταπτυχιακή διατριβή και στη διπλωματική μου εργασία. Ο κ. Μυλόπουλος με τις πρωτοπόρες ιδέες-εμπνεύσεις του μπόλιασε με επιτυχία τα καινοτόμα στοιχεία σε αυτή τη διατριβή. Η συνεχής καθοδήγησή του και το απαράμιλλο ήθος του τον καθιστά στα μάτια μου ένα μεγάλο «δάσκαλο», ο οποίος έχει τη δυνατότητα να μεταμορφώσει έναν νέο άνθρωπο σε επιστήμονα δίνοντας του όχι μόνο την ακαδημαϊκή γνώση αλλά και εκείνες τις ηθικές αξίες που θα τον κάνουν χρήσιμο στην κοινωνία.

Σημαντική υπήρξε και η συνεισφορά του κ. Αθανάσιου Λουκά, Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Π.Θ. και μέλος της τριμελούς επιτροπής. Ήταν τόσο συνεχής η επιστημονική του υποστήριξη, που πραγματικά τον θεωρώ και αυτόν επιβλέποντα της διατριβής. Η αστείρευτη επιστημονική γνώση που κατέχει με βοήθησε να ξεπεράσω πολλά εμπόδια όλα αυτά τα χρόνια. Τους ευχαριστώ θερμά από τα βάθη της καρδιάς μου και νιώθω πραγματικά τυχερός που ανδρώθηκα και ανδρώνομαι ως επιστήμονας δίπλα τους.

Καθοριστική υπήρξε και η συνεργασία μου με το τρίτο μέλος της τριμελούς επιτροπής τον κ. Περικλή Λατινόπουλο, Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ., αλλά και με τους κ. Άρη Ψιλοβίκο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος και κ. Γεώργιο Καρατζά, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, οι οποίοι με υποστήριξαν στο επιστημονικό κομμάτι της βελτιστοποίησης. Είναι μεγάλη μου τιμή να απαρτίζεται η εφταμελής επιτροπή από ονόματα εξαιρετικών επιστημόνων και καθηγητών, όπως κ. Γεώργιος Τσακίρης, Καθηγητής της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π και ο κ. Κωνσταντίνος Βουδούρης, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών του Α.Π.Θ. Από τον πανεπιστημιακό κύκλο δε θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τους φίλους και συνεργάτες μου Λάμπρο Βασιλείαδη, Χρυσόστομο Φαφούτη, Γιώργο Παπαϊωάννου, Πόπη Μιχαηλίδου-Νοταρά, Δημήτρη Μέμτσα, Μάριο Σπηλιωτόπουλο. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τη σύντροφο μου Μαρία Στάμου, για τη συνεχιζόμενη ηθική συμπαράσταση, αισιοδοξία και κατανόηση που μου παρέχει απλόχερα και εύχομαι να μου παρέχει για το υπόλοιπο της ζωής μου.

Η διατριβή αυτή δε θα μπορούσε να φτάσει στο τέλος της χωρίς τη βοήθεια των γονέων μου, Χρυσούλα και Γεώργιο, τους οποίους ευχαριστώ και τους την αφιερώνω.

Αφιερώνεται
Στους Γονείς Μου και στα Αδερφια Μου

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	viii
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	ix
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	xiv
ABSTRACT	xvi
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. Αντικείμενο της διατριβής	1
1.2. Διάρθρωση της έρευνας	2
1.3. Διάρθρωση της διδακτορικής διατριβής	5
1.4. Παρουσίαση των καινοτόμων σημείων της έρευνας	7
2. Η ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	10
2.1. Κατηγοριοποίηση της αβεβαιότητας	10
2.2. Μέθοδοι ανάλυσης της αβεβαιότητας	12
2.2.1. Ανάλυση της αβεβαιότητας των παραμέτρων του μοντέλου	13
2.2.2. Ανάλυση αβεβαιότητας του εννοιολογικού μοντέλου	13
2.2.3. Ανάλυση αβεβαιότητας των παρατηρούμενων δεδομένων	14
2.3. Στοχαστική προσομοίωση των υπόγειων υδάτων	15
2.3.1. Στατιστική επεξήγηση της στοχαστικής προσομοίωσης	17
2.3.2. Κύριες μέθοδοι στοχαστικής προσομοίωσης	20
2.3.3. Η μέθοδος Monte Carlo	21
2.3.4. Συμβολή της στοχαστικής προσομοίωσης της υδραυλικής αγωγιμότητας σε προβλήματα υπόγειας ροής.	27
2.4. Γεωστατιστική προσέγγιση	31
2.4.1. Μεταβητόγραμμα – Ημιμεταβλητόγραμμα	39
2.4.2. Kriging	41
3. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ	50
3.1. Διαχείριση Υδατικών Πόρων	50
3.2. Βελτιστοποίηση	53
3.2.1. Γραμμικός Προγραμματισμός	55
3.2.2. Μη Γραμμικός Προγραμματισμός	57
3.2.3. Η βελτιστοποίηση στη διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων	60
3.3. Προσομοίωση – Βελτιστοποίηση υπόγειων υδατικών πόρων.	67
3.4. Στοχαστική βελτιστοποίηση	73
3.5. Στοχαστική βελτιστοποίηση ή/και ανάλυση αποφάσεων?	77
4. Η ΑΞΙΑ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ	80
4.1. Βασικές αρχές της ανάλυσης Bayes	80
4.2. Η έννοια της αξίας της πληροφορίας	82
4.3. Η αξία της τέλει πληροφορίας	84
4.4. Αξία της μερικής πληροφορίας	86

4.5.	Η αξία της πληροφορίας στα προβλήματα διαχείρισης υπόγειων υδατικών συστημάτων	89
5.	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	97
5.1.	Υδρολογική λεκάνη απορροής λίμνης Κάρλας	97
5.2.	Κλιματικές – Υδρολογικές συνθήκες	98
5.3.	Χρήσεις Γης	101
5.3.1.	Δίκτυα άρδευσης	105
5.4.	Γεωλογία	107
5.4.1.	Γεωμορφολογία	107
5.4.2.	Στρωματογραφία και Τεκτονική	110
5.5.	Υδρογεωλογία	112
5.5.1.	Υδροφόροι σχηματισμοί	112
5.5.2.	Υδροφορία προσχωματικού και πεδινού τμήματος της Κάρλας	114
5.5.3.	Τροφοδοσία - Πιεζομετρία	115
5.6.	Η λίμνη Κάρλα	121
5.6.1.	Αποξήρανση της λίμνης Κάρλας	124
5.6.2.	Ιστορικό μελετών μέχρι την αποξήρανση	126
5.6.3.	Έργα αποξήρανσης της λίμνης Κάρλας	127
5.6.4.	Ανασύσταση της λίμνης Κάρλας	130
5.6.5.	Περιγραφή λειτουργίας του έργου	137
5.6.6.	Προστατευόμενες περιοχές της λεκάνης της Κάρλας.	138
6.	ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ	140
6.1.	Μοντέλο προσομοίωσης επιφανειακής απορροής	140
6.2.	Μοντέλο προσομοίωσης λειτουργίας του ταμιευτήρα	144
6.3.	Μοντέλο προσομοίωσης της υδραυλικής επικοινωνίας του ταμιευτήρα με τον υπόγειο υδροφόρο	146
6.4.	Μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής	149
6.4.1.	Μαθηματικό Υπόβαθρο του Modflow	149
6.4.2.	Διακριτοποίηση	152
6.4.3.	Εξίσωση πεπερασμένων διαφορών	153
6.4.4.	Καθορισμός οριακών συνθηκών	160
6.4.5.	Σχεδιασμός καννάβου	160
6.4.6.	Τρόποι προσέγγισης του MODFLOW	161
6.5.	Μοντέλο γεωστατιστικής προσέγγισης	161
6.5.1.	Data	163
6.5.2.	Postscript	166
6.5.3.	Variogram	167
6.5.4.	Kriging	170
6.5.5.	Simulation	170
6.5.6.	Ακολουθιακή Προσομοίωση (Sequential Simulation)	171
6.5.7.	Κανονική Προσομοίωση (Gaussian Simulation)	173
6.5.8.	Ακολουθιακή Κανονική Προσομοίωση (Sequential Gaussian Simulation)	175
6.6.	Μοντέλο διαχείρισης της υπόγειας ροής	177
6.6.1.	Διατύπωση προβλημάτων διαχείρισης υπόγειων υδάτων με τη χρήση του GWM.	178
6.6.2.	Επίλυση προβλημάτων διαχείρισης με χρήση του GWM	184
6.6.3.	Απαραίτητα αρχεία για την κατάσταση ενός προβλήματος	196
6.7.	Σύζευξη μοντέλων	205

7.	ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΚΑΡΛΑΣ	207
7.1.	Προσομοίωση επιφανειακής υδρολογίας	207
7.1.1.	Βέλτιστη εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου με το μοντέλο υπόγειας ροής	216
7.2.	Προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα	220
7.3.	Προσομοίωση της υδραυλικής επικοινωνίας του ταμιευτήρα με τον υπόγειο υδροφόρο	224
7.4.	Στοχαστική προσομοίωση της υδραυλικής αγωγιμότητας	225
7.5.	Προσομοίωση της υπόγειας ροής	237
7.5.1.	Κατάρτιση της γεωμετρίας του υπόγειου υδροφόρου και του καννάβου	237
7.5.2.	Καθορισμός των οριακών συνθηκών	238
7.5.3.	Καθορισμός εισροών και εκροών	239
7.5.4.	Καθορισμός υδρογεωλογικών παραμέτρων	242
7.5.5.	Καθορισμός των αρχικών συνθηκών	243
8.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΞΙΑΣ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΟΝ ΥΠΟΓΕΙΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΚΑΡΛΑΣ	265
8.1.	Το πρόβλημα της στοχαστικής βελτιστοποίησης	268
8.2.	Εκ των προτέρων κατάσταση	270
8.3.	Προ εκ των υστέρων κατάσταση#1	276
8.3.1.	Θεωρητική τιμή#1	278
8.3.2.	Θεωρητική τιμή#1'	279
8.4.	Εκ των υστέρων κατάσταση#1	281
8.5.	Προ εκ των υστέρων κατάσταση#2	286
8.6.	Εκ των υστέρων κατάσταση#2	287
8.7.	Προ εκ των υστέρων κατάσταση#3	294
8.8.	Εκ των υστέρων κατάσταση#3	295
8.9.	Προ εκ των υστέρων κατάσταση#4	301
9.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	309
9.1.	Γενικά συμπεράσματα διατριβής	309
9.2.	Ειδικά συμπεράσματα διατριβής	310
9.3.	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	312
	ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	314
	ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ	315
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	318

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4. 1. Κατηγοριοποίηση των εργασιών της αξίας της πληροφορίας, που λήφθηκαν υπόψη για την εν λόγω έρευνα.....	96
Πίνακας 5. 1. Χρήσεις γης και ποσοστά αυτών στη λεκάνης απορροής της Κάρλας.....	101
Πίνακας 5. 2. Είδη καλλιεργειών της λεκάνης της Κάρλας.....	104
Πίνακας 5. 3. Χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων άρδευσης.....	106
Πίνακας 5. 4. Περιοδικές μετρήσεις στάθμης πιεζομέτρων ευρύτερης περιοχής Κάρλας.....	117
Πίνακας 5. 5. Υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας και έκταση τη λίμνης για την περίοδο 1907-1959 (Ananiadis, 1956).....	123
Πίνακας 5. 6. Μελέτες αποξήρανσης της λίμνης Κάρλας.....	127
Πίνακας 5. 7. Τα έργα που συνέβαλαν στην αποξήρανση της λίμνης Κάρλας.....	130
Πίνακας 5. 8. Στάθμες λειτουργίας του ταμιευτήρα με τις αντίστοιχες τιμές επιφάνειας και όγκου νερού..	133
Πίνακας 5. 9. Κατηγορίες κόστους του έργου ανασύστασης.....	137
Πίνακας 7. 1. Αποτελέσματα γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ πεδινής ζώνης της λεκάνης της λίμνης Κάρλας και του Μ.Σ. Λάρισας για τη μηνιαία βροχόπτωση της περιόδου Οκτ. 1960 – Σεπ. 2012.....	215
Πίνακας 7. 2. Παράμετροι του UTHBAL για τις δύο λεκάνες, όπως προέκυψαν από τη ρύθμισή του.....	220
Πίνακας 7. 3. Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά υψομετρικών ζωνών και υδρολογικό ισοζύγιο για τις δύο υψομετρικές ζώνες στην υδρολογική λεκάνη Κάρλας μετά την εφαρμογή του ημι-κατανεμημένου υδρολογικού μοντέλου για την υδρολογική περίοδο Οκτ. 1960 - Σεπ. 2012.....	220
Πίνακας 7. 4. Στοιχεία των δειγματοληπτικών μετρήσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας.....	226
Πίνακας 7. 5. Αρχείο εισόδου των δεδομένων υδραυλικής αγωγιμότητας στο GSLIB.....	227
Πίνακας 7. 6. Αρχείο μετασχηματισμού των λογαριθμικών τιμών σε λογοκανονικές.....	228
Πίνακας 7. 7. Αρχείο κατάρτισης πειραματικού ημιβαριογράμματος.....	229
Πίνακας 7. 8. Αρχείο κατάρτισης του θεωρητικού ημιβαριογράμματος.....	230
Πίνακας 7. 9. Κατάρτιση του αρχείου της μεθόδου Simple Kriging.....	231
Πίνακας 7. 10. Κατάρτιση αρχείου SGSIM για την παραγωγή στοχαστικών πραγματώσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας.....	231
Πίνακας 7. 11. Εύρος των ετήσιων όγκων του υπόγειου αντλούμενου νερού (σε hm^3) για κάθε ζώνη και για κάθε χρήση.....	241
Πίνακας 7. 12. Θέσεις και στάθμες των πηγαδιών παρατήρησης.....	244
Πίνακας 7. 13. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες τιμές για την 01/1997.....	246
Πίνακας 7. 14. Στατιστικά κριτήρια ρύθμισης του μοντέλου.....	247
Πίνακας 8. 1. Διαφορές των τιμών $1^{ου}$ και $3^{ου}$ τεταρτημορίου σε μέτρα των θηκογραμμάτων των 100 στοχαστικών υδραυλικών υψών για τις τομές ZZ', HH', ΘΘ' και Π' για την 01/ 2044.....	307

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2. 1. Γραφική αναπαράσταση της κατηγοριοποίησης της αβεβαιότητας στην προσομοίωση.	12
Σχήμα 2. 2. Προσέγγιση μια τιμής μιας μεταβλητής μέσω: α. της ντετερμινιστικής προσομοίωσης και β. της στοχαστικής προσομοίωσης.	17
Σχήμα 2. 3. Σχηματική αναπαράσταση της προσομοίωσης Monte Carlo για την υδραυλική αγωγιμότητα στην προσομοίωση της υπόγειας ροής από τους (Bierkens και Van Geer, 2008).	24
Σχήμα 2. 4. Παραγωγή ενός τυχαίου αριθμού από μια δοσμένη συνάρτηση κατανομής.	24
Σχήμα 2. 5. Επίδραση του αριθμού τωνπραγματώσεων Monte Carlo στην εκτίμηση της επικινδυνότητας από τους Robinson και Hodgkinson (1986).	26
Σχήμα 2. 6. Χρονική εξέλιξη του: α) αριθμού των εργασιών σε διεθνή περιοδικά που σχετίζονται με την υδρογεωλογία, την προσομοίωσή της και τη στοχαστική προσομοίωσή της και β) ποσοστού των εργασιών της στοχαστικής προσομοίωσης σε σχέση με την προσομοίωση και την υδρογεωλογία σύμφωνα με τον Renard (2007).	31
Σχήμα 2. 7. Το ζεύγος των σημείων (x_b, y_b) σε ένα διάγραμμα διασποράς.	37
Σχήμα 3. 1. Γραφική επίλυση ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού.	56
Σχήμα 3. 2. Παράδειγμα ελαχίστων μια συνάρτησης μεταβλητής.	58
Σχήμα 3. 3. Κατηγοριοποίηση διαχειριστικών μοντέλων υπόγειων υδάτων σύμφωνα με τον Gorelick (1983).	61
Σχήμα 3. 4. Διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου του μητρώου μοναδιαίας απόκρισης σύμφωνα με τον Theodossiou (2004).	71
Σχήμα 3. 5. Τέσσερα κλασικά πλαίσια σχεδιασμού (Freeze and Gorelick, 1999)	78
Σχήμα 3. 6. Προτεινόμενο πλαίσιο σχεδιασμού της εν λόγω έρευνας	79
Σχήμα 4. 1. Ανάλυση της αξίας της πληροφορίας για τρία επίπεδα αβεβαιότητας σε σχέση με το κέρδος διαχείρισης (Wagner, 1999).	83
Σχήμα 4. 2. Σχέση της αναμενόμενης αξίας της μερικής πληροφορίας και της αβεβαιότητας με τον αριθμό δειγματοληψιών	89
Σχήμα 5. 1. Χάρτης της υδρολογικής λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας.	98
Σχήμα 5. 2. Μέση ετήσια θερμοκρασία για τη λεκάνη της Κάρλας	100
Σχήμα 5. 3. Μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης και μέση ετήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή για τη λεκάνη της Κάρλας.	100
Σχήμα 5. 4. Ποσοστιαία κάλυψη των χρήσεων γης	102
Σχήμα 5. 5. Χάρτης χρήσεων γης με τους κωδικούς τους για τη λεκάνη της Κάρλας.	103
Σχήμα 5. 6. Ποσοστιαία κάλυψη των καλλιεργειών σε επίπεδο λεκάνης απορροής.	105
Σχήμα 5. 7. Εξυπηρετούμενες εκτάσεις από τους ΤΟΕΒ Πηνειού και Κάρλας.	107
Σχήμα 5. 8. Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης.	111
Σχήμα 5. 9. Τομή ΑΒ στην ανατολική Θεσσαλία, στην οποία φαίνεται (1): η ανώτατη ετήσια στάθμη του έτους 1973 και (2): η ανώτατη ετήσια στάθμη του 2003. ΡΖΤ, ΛΒ, ΣΡ κ.λπ.: θέσεις πιεζομετρικών γεωτρήσεων παρατήρησης (Ευαγγελόπουλος, 2003)	116
Σχήμα 5. 10. Θέσεις πηγαδιών παρατήρησης και όρια των ζωνών πιεζομετρίας	120
Σχήμα 5. 11. Διάγραμμα της πτώσης στάθμης των πηγαδιών παρατήρησης	121
Σχήμα 5. 12. Σκαρίφημα της προϊστορικής και σύγχρονης έκτασης της τέως λίμνης Κάρλας.	122
Σχήμα 5. 13. Αεροφωτογραφίας της τέως λίμνης Κάρλας από τη Γ.Υ.Σ. το 1945.	124
Σχήμα 5. 14. Τελικό τμήμα της τάφρου ΙΤ με τη σήραγγα να φαίνεται στο βάθος.	128
Σχήμα 5. 15. Σύγχρονη κατάληξη της τάφρου 2Τ στον ταμειωτήρα της Κάρλας.	128
Σχήμα 5. 16. Είσοδος - Έξοδος της σήραγγας της Κάρλας.	129
Σχήμα 5. 17. Νομογράφημα της επιφάνειας και του όγκου της λίμνης σε σχέση με τη στάθμη της.	133
Σχήμα 5. 18. Έργα ανασύστασης της λίμνης Κάρλας.	136

Σχήμα 5. 19. Περιοχές του δικτύου NATURA 2000 και Καταφύγια Άγριας Ζωής της λεκάνης της Κάρλας	139
Σχήμα 6. 1. Οι έξι παράμετροι (με κόκκινη γραμματοσειρά) για τις οποίες ρυθμίζεται το μοντέλο.	144
Σχήμα 6. 2. Σχηματική παράσταση των παραπάνω όρων.....	148
Σχήμα 6. 3. Χωρική διακριτοποίηση ενός τρισδιάστατου υδροφορέα	152
Σχήμα 6. 4. Το κελί (i,j,k) και τα γειτονικά του.	154
Σχήμα 6. 5. Ροή από το κελί (i,j,k) στο (i,j-1,k) κατά τη διεύθυνση των γραμμών	155
Σχήμα 6. 6. Τύποι κελιών και προσομοίωση οριακών συνθηκών.....	160
Σχήμα 6. 7. Κεντρικό menu του WinGslib.....	162
Σχήμα 6. 8. Ένα 2D παράδειγμα της μεθόδου αποδέσμευσης.....	164
Σχήμα 6. 9. Τα πέντε μοντέλα μεταβλητογράμματος που παρέχει το GSLIB.....	168
Σχήμα 6. 10. Χαρακτηριστικά του γραφήματος ενός μεταβλητογράμματος.....	169
Σχήμα 6. 11. Γράφημα Συνάρτησης Πυκνότητας Πιθανότητας PDF.....	175
Σχήμα 6. 12. Τύποι περιορισμών στο υδραυλικό φορτίο που υποστηρίζονται από το GWM (Ahlfeld D.P. et. al., 2005).	184
Σχήμα 6. 13. Διάγραμμα σύζευξης των μοντέλων.....	206
Σχήμα 7. 1. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ) λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας.....	208
Σχήμα 7. 2. Ορεινή και πεδινή ζώνη της λεκάνης και η θέση του υπόγειου υδροφορέα.....	209
Σχήμα 7. 3. Σταθμοί μέτρησης μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.	210
Σχήμα 7. 4. Γραμμική σχέση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας με το υψόμετρο των μετεωρολογικών σταθμών για τις δύο υψομετρικές ζώνες.....	210
Σχήμα 7. 5. Σταθμοί μέτρησης μηνιαίας υετόπτωσης στην ευρύτερη περιοχή μελέτης	212
Σχήμα 7. 6. Πολύγωνα Thiessen στην πεδινή και ορεινή ζώνη της υδρολογικής λεκάνης Κάρλας	213
Σχήμα 7. 7. Γραμμική σχέση της μέσης ετήσιας υετόπτωσης με το υψόμετρο των μετεωρολογικών σταθμών για τις δύο υψομετρικές ζώνες της υδρολογικής λεκάνης της Κάρλας.....	214
Σχήμα 7. 8. Χωρική δομή προσομοίωσης της λεκάνης από το UTHBAL: α) Ενιαία μορφή και β) κατανεμημένη.....	217
Σχήμα 7. 9. Διάγραμμα με τις προσομοιωμένες απορροές των τριών χωρικών μορφών του UTHBAL και τις παρατηρούμενες	217
Σχήμα 7. 10. Μηνιαίες προσομοιωμένες και παρατηρούμενες απορροές	219
Σχήμα 7. 11. Γραφήματα μηνιαίων τιμών του όγκου νερού του ταμιευτήρα και της βροχόπτωσης για τη διαχειριστική περίοδο 2012-2044	222
Σχήμα 7. 12. Ετήσιες τιμές εισροών και εκροών του ταμιευτήρα για τη διαχειριστική περίοδο 2012-2044	223
Σχήμα 7. 13. Ποσοστά μέσων ετήσιων: α) Εισροών και β) Εκροών του ταμιευτήρα για τη διαχειριστική περίοδο 2012-2044	224
Σχήμα 7. 14. Σύγκλιση προσομοιωμένων και παρατηρούμενων υψομέτρων στάθμης του ταμιευτήρα για τη δεκαετία προσομοίωσής του.....	225
Σχήμα 7. 15. Θέσεις των δειγματοληπτικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας	226
Σχήμα 7. 16. Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης των δειγματοληπτικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας σε m/d.....	227
Σχήμα 7. 17. Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των λογαριθμικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας	227
Σχήμα 7. 18. Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των λογοκανονικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας	229
Σχήμα 7. 19. Πειραματικό και θεωρητικό ημιβαριόγραμμα	230
Σχήμα 7. 20. Χάρτης με την κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας (σε m/d) και ιστόγραμμα εμφάνισης, μαζί με τα στατιστικά χαρακτηριστικά για α) την απεικόνιση 10 και β) την απεικόνιση 40.	234
Σχήμα 7. 21. Χάρτης με την κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας (σε m/d) και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των λογαριθμικών της τιμών, μαζί με τα στατιστικά χαρακτηριστικά για α) την απεικόνιση 1 και β) την απεικόνιση 33.....	235

Σχήμα 7. 22. Χάρτης με την κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας (σε m/d) και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των λογαριθμικών της τιμών, μαζί με τα στατιστικά χαρακτηριστικά για α) την απεικόνιση 66 και β) την απεικόνιση 100.....	236
Σχήμα 7. 23. Οριακές συνθήκες, γεωτρήσεις, αρδευτικές ζώνες και πηγάδια παρατήρησης του μοντέλου υπόγειας ροής.....	242
Σχήμα 7. 24. Κατανομή του συντελεστή αποθηκευτικότητας στο πεδίο μελέτης.....	243
Σχήμα 7. 25. Κατανομή των αρχικών υδραυλικών υψών του μοντέλου υπόγειας ροής	245
Σχήμα 7. 26. Διάγραμμα διασποράς προσομοιωμένων έναντι παρατηρούμενων υδραυλικών υψών, με τη γραμμική τάσης (κόκκινη) και την 1:1 γραμμή (μαύρη).....	248
Σχήμα 7. 27. Μηνιαίες παροχές των αντλούμενων και ανανεώσιμων υδάτων του υπόγειου υδροφορέα για την περίοδο 1987-1997	249
Σχήμα 7. 28. Ετήσιο υδατικό ισοζύγιο του υπόγειου υδροφορέα για την περίοδο 1987-1997.....	250
Σχήμα 7. 29. Χάρτης των μέσων τιμών των υδραυλικών υψών από τις 100 πραγματώσεις του υδροφορέα για το 1997.....	251
Σχήμα 7. 30. Διαφορά υδραυλικών υψών των ετών 1987 και 1997	252
Σχήμα 7. 31. Προσομοιωμένα μέσα υδραυλικά ύψη και παρατηρούμενα στα κελιά δέκα ενδεικτικών πηγαδιών παρατήρησης για τη δεκαετία '87-'97	253
Σχήμα 7. 32. Τομές του πεδίου μελέτης για τα αποτελέσματα του 1997.....	254
Σχήμα 7. 33. Παρατηρούμενα και μέσα υδραυλικά ύψη των 100 προσομοιώσεων για τις τομές: α. ΓΓ', β. ΔΔ' και γ. ΕΕ'	255
Σχήμα 7. 34. Μηνιαίες παροχές των αντλούμενων και ανανεώσιμων υδάτων του υπόγειου υδροφορέα για την περίοδο 1987-1997	257
Σχήμα 7. 35. Ετήσιο υδατικό ισοζύγιο του υπόγειου υδροφορέα για την περίοδο 1987-1997.....	258
Σχήμα 7. 36. Χάρτης των μέσων τιμών των υδραυλικών υψών από τις 100 πραγματώσεις του υδροφορέα για το 2012.....	259
Σχήμα 7. 37. Διαφορά υδραυλικών υψών: α. του 1987 με του 2012 και β. του 1997 με του 2012	260
Σχήμα 7. 38. Τομές του πεδίου μελέτης για τα αποτελέσματα του 2012.....	261
Σχήμα 7. 39. Θηκογράμματα των 100 υδραυλικών υψών της 01/2012 συν υψόμετρο εδάφους, υδραυλικό ύψος αρχικών συνθηκών (01/1987), μέσο υδραυλικό ύψος της 01/1997, σε συγκεκριμένα κελιά των τομών: α. ΖΖ', β. ΗΗ', γ. ΘΘ' και δ. ΙΙ'	263
Σχήμα 8. 1. Χάρτης υδραυλικών υψών του υπόγειου υδροφορέα την 01/2044 για το σενάριο «do nothing»	266
Σχήμα 8. 2. Υδραυλικά ύψη των επιλεγμένων κελιών για τις διάφορες ημερομηνίες και υψόμετρο του εδάφους στις τομές α. ΖΖ' και β. ΗΗ'	267
Σχήμα 8. 3. Τα όρια της μεγαλύτερης και μικρότερης περιοχής του υπόγειου υδροφορέα, από τις οποίες επιτρέπεται να αντληθεί υπόγειο νερό	271
Σχήμα 8. 4. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα	272
Σχήμα 8. 5. Διάγραμμα ετήσιου καθαρού κέρδους για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα	273
Σχήμα 8. 6. Θέσεις των γεωτρήσεων άντλησης για τις απεικονίσεις του υπόγειου υδροφορέα με τον μέγιστο και ελάχιστο αριθμό αυτών	273
Σχήμα 8. 7. Λογικό διάγραμμα της διαδικασίας της αξίας της πληροφορίας	275
Σχήμα 8. 8. α. Χάρτης των τυπικών αποκλίσεων των 100 προσομοιώσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των προτέρων κατάσταση και β. χάρτης με τη θέση της μέγιστης τιμής της τυπικής απόκλισης. 277	
Σχήμα 8. 9. Θέσεις των δύο θεωρητικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας της προ εκ των υστέρων κατάστασης	278
Σχήμα 8. 10. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #1.....	279
Σχήμα 8. 11. Διάγραμμα ετήσιου καθαρού κέρδους για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #1	279
Σχήμα 8. 12. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #1'	280

Σχήμα 8. 13. Διάγραμμα ετήσιου καθαρού κέρδους για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #1'	280
Σχήμα 8. 14. Η θέση της νέας δειγματοληπτικής τιμής τη υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#1	281
Σχήμα 8. 15. Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης των δειγματοληπτικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας σε m/d για την εκ των υστέρων κατάσταση#1	282
Σχήμα 8. 16. Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των λογαριθμικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#1	282
Σχήμα 8. 17. Πειραματικό και θεωρητικό ημιβαριόγραμμα της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#1	283
Σχήμα 8. 18. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα της εκ των υστέρων κατάστασης#1	283
Σχήμα 8. 19. Διάγραμμα ετήσιου καθαρού κέρδους για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα της εκ των υστέρων κατάστασης#1	284
Σχήμα 8. 20. Αξία της πληροφορίας για την πρώτη δειγματοληπτική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας..	284
Σχήμα 8. 21. Χάρτης της α. μέσης τιμής και β. της τυπικής απόκλισης των 100 εξαρτημένων πραγματώσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#1	285
Σχήμα 8. 22. Θέση της μέγιστης τιμής της τυπικής απόκλισης της υδραυλικής αγωγιμότητας και θέσεις των γεωτρήσεων άντλησης για την εκ των υστέρων κατάσταση#1	286
Σχήμα 8. 23. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #2.....	287
Σχήμα 8. 24. Διάγραμμα ετήσιου καθαρού κέρδους για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #2	287
Σχήμα 8. 25. Η θέση της νέας δειγματοληπτικής τιμής τη υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#2	288
Σχήμα 8. 26. Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης των δειγματοληπτικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας σε m/d για την εκ των υστέρων κατάσταση#2	289
Σχήμα 8. 27. Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των λογαριθμικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#2	289
Σχήμα 8. 28. Πειραματικό και θεωρητικό ημιβαριόγραμμα της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#2.....	290
Σχήμα 8. 29. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα της εκ των υστέρων κατάστασης #2	290
Σχήμα 8. 30. Διάγραμμα ετήσιου καθαρού κέρδους για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα της εκ των υστέρων κατάστασης #2	291
Σχήμα 8. 31. Αξία της πληροφορίας για τη δεύτερη δειγματοληπτική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας .	291
Σχήμα 8. 32. Χάρτης της α. μέσης τιμής και β. της τυπικής απόκλισης των 100 εξαρτημένων πραγματώσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#2	293
Σχήμα 8. 33. Θέση της μέγιστης τιμής της τυπικής απόκλισης της υδραυλικής αγωγιμότητας και θέσεις των γεωτρήσεων άντλησης για την εκ των υστέρων κατάσταση#2.....	294
Σχήμα 8. 34. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #3.....	295
Σχήμα 8. 35. Διάγραμμα ετήσιου καθαρού κέρδους για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #3	295
Σχήμα 8. 36. Η θέση της νέας δειγματοληπτικής τιμής τη υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#3	296
Σχήμα 8. 37. Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης των δειγματοληπτικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας σε m/d για την εκ των υστέρων κατάσταση#3	297
Σχήμα 8. 38. Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των λογαριθμικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#3	297
Σχήμα 8. 39. Πειραματικό και θεωρητικό ημιβαριόγραμμα της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#3.....	298

Σχήμα 8. 40. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα της εκ των υστέρων κατάστασης #3	298
Σχήμα 8. 41. Διάγραμμα ετήσιου καθαρού κέρδους για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα της εκ των υστέρων κατάστασης #3	299
Σχήμα 8. 42. Αξία της πληροφορίας για την τρίτη δειγματοληπτική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας	299
Σχήμα 8. 43. Χάρτης της α. μέσης τιμής και β. της τυπικής απόκλισης των 100 εξαρτημένων πραγματώσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#3	300
Σχήμα 8. 44. Θέση της μέγιστης τιμής της τυπικής απόκλισης της υδραυλικής αγωγιμότητας και θέσεις των γεωτρήσεων άντλησης για την εκ των υστέρων κατάσταση#3.....	301
Σχήμα 8. 45. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #4.....	302
Σχήμα 8. 46. Διάγραμμα ετήσιου καθαρού κέρδους για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #4	302
Σχήμα 8. 47. Αξία της πληροφορίας της κάθε νέας μέτρησης και οικονομική αβεβαιότητα της κάθε κατάστασης	303
Σχήμα 8. 48. Οικονομική αβεβαιότητα και μέγιστη τυπική απόκλιση για κάθε κατάσταση.....	304
Σχήμα 8. 49. Απόλυτη διαφορά της πραγματικής τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας με τη θεωρητική για κάθε κατάσταση.	304
Σχήμα 8. 50. Χάρτης των μέσων τιμών των υδραυλικών υψών των 100 βέλτιστων απεικονίσεων του υπόγειου υδροφορέα της εκ των υστέρων κατάστασης#3 για το 2044.....	305
Σχήμα 8. 51. Θηκογράμματα των 100 υδραυλικών υψών της 01/2044, υψόμετρο εδάφους και ύψος αρχικών συνθηκών (01/1987), σε συγκεκριμένα κελιά των τομών: α. ΖΖ', β. ΗΗ', γ. ΘΘ' και δ. Π'	307
Σχήμα 8. 52. Καμπύλες αξιοπιστίας των βέλτιστων στρατηγικών διαχείρισης για την αρχική πληροφορία και την πληροφορία προερχόμενη από τις τρεις καμπάνιες δειγματοληψίας.	308

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διατριβή προτείνεται και εφαρμόζεται επιτυχώς ένα καινοτόμο εργαλείο απόφασης για τη βέλτιστη και ταυτόχρονα βιώσιμη διαχείριση ενός υπόγειου υδροφορέα που βρίσκεται σε κατάσταση εντατικής εκμετάλλευσης, σε συνθήκες υδρογεωλογικής αβεβαιότητας. Απαρτίζεται από ειδικά συνδυασμένα μοντέλα, τέσσερα εκ των οποίων είναι μοντέλα προσομοίωσης. Για τη λειτουργία του συστήματος αυτού χρησιμοποιούνται και συνδυάζονται στοιχεία από την στοχαστική ανάλυση, την προσομοίωση των υδατικών συστημάτων και τη διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων.

Το υπόψη σύστημα χρησιμοποιείται αρχικά για την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης του υπόγειου κοκκώδη υδροφορέα της λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας, από ποσοτικής πλευράς. Η έρευνα στηρίζεται σε ιστορικά δεδομένα και τα αποτελέσματα της αποδεικνύουν το καθεστώς υπερεκμετάλλευσης του υπόγειου υδροφορέα, το οποίο συνεχίζεται μέχρι και σήμερα. Εξαιτίας, όμως, της χωρικής μεταβλητότητας της υδραυλικής αγωγιμότητας και της έλλειψης επαρκών δειγματοληπτικών τιμών της, η εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης του υπόγειου υδροφορέα εμπεριέχει αβεβαιότητα. Η αβεβαιότητα αυτή αποτιμάται με τη χρήση της στοχαστικής προσομοίωσης και ειδικότερα με τη χρήση γεωστατιστικών μεθόδων. Αφού λοιπόν εκτιμηθούν η κατάσταση του υδατικού δυναμικού του υπόγειου υδροφορέα ποσοτικά και αποτιμηθεί η αβεβαιότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας, τίθεται σε εφαρμογή ένα μεθοδολογικό πλαίσιο αποκατάστασης του υπόγειου υδροφορέα, σε μελλοντική περίοδο. Σημαντικό ρόλο στην αποκατάσταση αυτή παίζει βέβαια και το έργο ανασύστασης της λίμνης Κάρλας, το οποίο αποτελεί το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό έργο των Βαλκανίων. Η συνεισφορά του έργου αυτού, αφορά στην κάλυψη μεγάλου ποσοστού των αρδευτικών αναγκών σε νερό από το επιφανειακό δυναμικό του νέου ταμιευτήρα, καθιστώντας την προτεινόμενη, από την παρούσα έρευνα, στρατηγική διαχείρισης απολύτως ρεαλιστική και εφαρμόσιμη. Στο σύστημα συμμετέχουν και άλλα μοντέλα προσομοίωσης των υπόλοιπων υδατικών πόρων της λεκάνης απορροής, εκπληρώνοντας τις επιταγές της ευρωπαϊκής νομοθεσίας για την ολοκληρωμένη διαχείριση σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Η ποσοτική αποκατάσταση του υπόγειου υδροφορέα βασίζεται στη βέλτιστη διαχείριση των ανανεώσιμων αποθεμάτων του, πάλι όμως σε συνθήκες αβεβαιότητας. Κι αυτό γιατί, για τη λήψη της ορθής απόφασης θα πρέπει να απεικονίζονται ξεκάθαρα όλες οι πιθανές λύσεις, αλλά και η επικινδυνότητα (ρίσκο) που η καθεμία από αυτές εμπεριέχει. Με τον τρόπο αυτό η στρατηγική διαχείρισης, που τελικά θα επιλεγεί, θα αποφέρει τα βέλτιστα αποτελέσματα έχοντας συμπεριλάβει όλες τις παραμέτρους του πολύπλοκου προβλήματος.

Η διαχείριση του υδροφορέα στοχεύει όχι μόνο στην ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα και την αποκατάστασή του, αλλά και στον υπολογισμό ταυτόχρονα του βέλτιστου επιτρεπόμενου αντλούμενου υδατικού όγκου για άρδευση. Αφού λοιπόν, σε πρώτη φάση εξασφαλιστεί η περιβαλλοντική απαίτηση της αποκατάστασης του υπόγειου υδροφορέα σε βάθος δεδομένου χρόνου, δεσμεύοντας ένα σημαντικό ποσοστό των ανανεώσιμων αποθεμάτων του, στη συνέχεια εκτιμάται η βέλτιστη χρήση των υπόλοιπων υδατικών διαθέσιμων για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών, με στόχο τη μεγιστοποίηση του κέρδους του διαχειριστή. Η διαχείριση του υπόγειου υδροφορέα δεν σταματά όμως εδώ. Η παραμετρική αβεβαιότητα οδηγεί σε σημαντική οικονομική αβεβαιότητα στα αποτελέσματα της διαχείρισης, δημιουργώντας συνθήκες επικινδυνότητας στη λήψη οποιασδήποτε στρατηγικής αποκατάστασης. Εδώ,

προτείνεται μία νέα μεθοδολογία για τον υπολογισμό του βέλτιστου πλήθους των μετρήσεων της παραμέτρου στο πεδίο, που θα οδηγήσει στη μείωση της παραμετρικής αβεβαιότητας και εν τέλει και της οικονομικής, δίνοντας στον διαχειριστή μία πιο ξεκάθαρη εικόνα για τη λήψη της διαχειριστικής στρατηγικής που θα ακολουθήσει.

Στην παρούσα ερευνητική εργασία χρησιμοποιούνται νέες, καινοτόμες μεθοδολογίες της διαχείρισης των υδατικών πόρων, αλλά και μεθοδολογίες, που έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως και σε άλλες επιστήμες. Αρχικά επιστρατεύεται η στοχαστική προσομοίωση της υδραυλικής αγωγιμότητας, με τη χρήση γεωστατιστικών εργαλείων, για την εκτίμηση της αβεβαιότητας που αυτή επιφέρει στα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής. Στη συνέχεια, και στο πλαίσιο της διαχείρισης, χρησιμοποιείται η στοχαστική βελτιστοποίηση, μέσω της προσέγγισης Monte Carlo, για την αποτίμηση της προαναφερθείσας αβεβαιότητας στα αποτελέσματα της διαχείρισης. Τέλος, γίνεται χρήση της ανάλυσης αποφάσεων, με τη μορφή της αξίας της πληροφορίας, η οποία σε συνδυασμό με τη χρήση της κατά Bayes ανάλυσης, οδηγεί σε μία στρατηγική διαχείρισης που έχει ως στόχο τη μείωση τόσο της παραμετρικής όσο και της οικονομικής αβεβαιότητας.

Η εφαρμογή του προτεινόμενου εργαλείου, το οποίο στηρίζεται στις προαναφερόμενες μεθοδολογίες, αποδεικνύεται επιτυχής και εφαρμόσιμη, δίνοντας αξιόπιστα αποτελέσματα τόσο για την αποκατάσταση του υπόγειου υδροφορέα, όσο και για τη βέλτιστη και βιώσιμη διαχείρισή του, υπό συνθήκες αβεβαιότητας.

ABSTRACT

In this study an innovative decision framework is presented for the optimum and sustainable management of an over-exploited aquifer, under uncertain conditions. This framework is a modelling system of specifically designed and combined models and which use information from the stochastic analysis, the water resources simulation and the groundwater management. The models that are incorporated and combined – through their data exchange – are six, with four of them being simulation models.

Initially the modeling system was used for the simulation of Lake Karla watershed aquifer's present situation. Historical data series were used and the results confirm the over-exploitation status of the aquifer and the impressive drop of the water table. The heterogeneity of hydraulic conductivity though and the lack of data, create an uncertain hydrogeological environment. The K parameter uncertainty is assessed through the use of stochastic simulation and more specifically through geostatistical methods. Since the quantitative status of aquifer and the hydraulic conductivity uncertainty are assessed, a conceptual framework of reservoir restoration is developed. Lake Karla recreation project, which is the most important environmental project in Balkans, plays critical role to this restoration. The management plan of this project involves the supply of a great part of irrigation water needs from the surface water of the new reservoir, making the proposed strategy absolutely realistic and applicable. Other simulation models of the watershed water resources are incorporated in the system, fulfilling the European legislation terms for the integrated water management at the watershed scale. Aquifer's restoration is based on the optimal management of its renewal resources, under uncertainty. Thus, all possible and alternative management strategies can be presented properly, including the relevant risks. The strategy that will be selected eventually, will generate the optimum results taking into account all the parameters of the complex problem.

In the present study, the goal of the groundwater management problem is not only the aquifer's water table restoration, but also the optimal allowable groundwater volume that will be extracted for irrigation need. Since, in a first place, the environmental requirement of future aquifer's restoration is satisfied, then the optimal use of the remaining renewable resources can be assessed. Nevertheless, to confirm the parametric uncertainty, which leads to an important financial uncertainty, a new methodology is employed. The methodology results to the definition of the optimal hydraulic conductivity sample values, which will lead to the parameter uncertainty decrease and finally to the financial cost decrease, one, creating a more clear picture for the administrator.

In this study, new and innovative methodologies of water resources management and others which have been widely used in others sciences, are employed. Firstly, hydraulic conductivity stochastic simulation, with the use of geostatistical tools, is employed for the evaluation of uncertainty on the groundwater simulation results. Consequently, in the management process, the stochastic optimization is used, through Monte Carlo approach, for the evaluation of the parametric uncertainty on the management results. Finally, the decision analysis is used, with the form of value of information and in conjunction with Bayes analysis. The whole process results to a management strategy which targets to the parameter and financial uncertainty decrease.

The application of proposed framework, which is based to these methodologies, is proved successful and applicable, giving reliable results both on aquifer's restoration and on its optimal management, under uncertainty conditions.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Αντικείμενο της διατριβής

Η παρούσα έρευνα αποσκοπεί στην εφαρμογή ενός μεθοδολογικού πλαισίου για τη βέλτιστη και βιώσιμη διαχείριση ενός ποσοτικά υποβαθμισμένου υπόγειου υδροφορέα, υπό συνθήκες παραμετρικής αβεβαιότητας. Περιοχή μελέτης αποτελεί ο φρεάτιος υπόγειος υδροφορέας της υδρολογικής λεκάνης της λίμνης Κάρλας. Το μεθοδολογικό πλαίσιο μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε άλλο υπόγειο υδατικό σύστημα, αποσκοπώντας ταυτόχρονα στην αποκατάσταση του υδροφόρου ορίζοντά του και στη μεγιστοποίηση του κέρδους του διαχειριστή από την πώληση του «επιτρεπόμενου» (ανανεώσιμου) όγκου υπόγειου ύδατος, λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα που υπεισέρχεται από την χωρική μεταβλητότητα και την έλλειψη δεδομένων της υδραυλικής αγωγιμότητας. Η πώληση του υπόγειου ύδατος αποσκοπεί στην κάλυψη των αρδευτικών αναγκών των καλλιεργειών, μιας και η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται καθαρά ως αγροτική, με γνώμονα την Οδηγία Πλαίσιο 2000/60/ΕΚ. Το κέρδος του διαχειριστή, από τις πωλήσεις του υπόγειου ύδατος είναι αυτό που θα του επιτρέψει να ανακτήσει ολόένα και καλύτερη εικόνα της υδρογεωλογικής συμπεριφοράς του υπόγειου υδροφορέα – γεγονός, το οποίο επιτυγχάνεται με τη χρήση της αξίας της πληροφορίας – ώστε να μειωθεί στο μέτρο του δυνατού η μελετούμενη αβεβαιότητα. Αυτό θα προστατεύσει τον διαχειριστή από τη λήψη μη ορθών στρατηγικών διαχείρισης και θα επιτύχει την αειφορία του υπόγειου υδροφορέα. Με άλλα λόγια, το πλαίσιο αυτό επιτυγχάνει και τους τρεις προσδιορισμούς, που ο Καλλέργης (2001) έθεσε για την έννοια της διαχείρισης: ορθολογική, βέλτιστη και αειφόρος.

Η επίτευξη όμως αυτού του στόχου προϋποθέτει την ταυτόχρονη χρήση καινοτόμων μεθοδολογιών και σύγχρονων υπολογιστικών μοντέλων προσομοίωσης και διαχείρισης. Τα μοντέλα προσομοίωσης και διαχείρισης καλούνται να εφαρμόσουν ό,τι ρητά ορίζουν οι προαναφερόμενες μεθοδολογίες. Για το λόγο αυτό και στην εν λόγω έρευνα, έχει προταθεί ένα σύστημα μοντέλων.

Η διατριβή υλοποίησε τους εξής κύριους ερευνητικούς στόχους:

- Την ολοκληρωμένη βιβλιογραφική επισκόπηση των καινοτόμων μεθοδολογιών που χρησιμοποιήθηκαν: ανάλυση αβεβαιότητας, στοχαστική προσομοίωση, στοχαστική βελτιστοποίηση και αξία της πληροφορίας.
- Την εφαρμογή ενός συστήματος μοντέλων προσομοίωσης και διαχείρισης, το οποίο λαμβάνοντας υπόψη τις υδρολογικές διεργασίες σε επίπεδο λεκάνης απορροής, μελετά υπό συνθήκες αβεβαιότητας το υπόγειο υδατικό σύστημα και στοχεύει στη βέλτιστη και βιώσιμη διαχείρισή του.
- Την αποτίμηση της αβεβαιότητας της υδραυλικής αγωγιμότητας και με οικονομικούς όρους και την κατάσταση μιας στρατηγικής λήψης

δειγματοληπτικών τιμών αυτής, για τη μείωση της αβεβαιότητας, ώστε να επιτευχθεί ο προαναφερθέντας στόχος.

- Την εφαρμογή των ανωτέρω στον φρεάτιο, κοκκώδη υπόγειο υδροφορέα της υδρολογικής λεκάνης της λίμνης Κάρλας, στην Ανατολική Θεσσαλία. Στη διαχείριση αυτού λήφθηκε υπόψη και η λειτουργία του ταμιευτήρα της Κάρλας, το οποίο αποτελεί το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό έργο των Βαλκανίων.

Το τελικό επιστέγασμα των προσπαθειών είναι η επιχειρησιακή αξιοποίηση του συστήματος βέλτιστης και βιώσιμης διαχείρισης ενός υπόγειου υδροφορέα, υπό συνθήκες παραμετρικής αβεβαιότητας. Σημειώνεται ότι για την εφαρμογή του συστήματος αυτού σε άλλη περιοχή μελέτης ή σε μεγαλύτερη κλίμακα, πρέπει να εξεταστούν από την αρχή τα επιμέρους μοντέλα αυτού ώστε να βελτιστοποιηθούν καλύτερα και να γενικευτεί η αξιοπιστία του.

1.2. Διάρθρωση της έρευνας

Η έρευνα ξεκινά με την συλλογή βιβλιογραφικής αναφοράς και όλων των απαιτούμενων δεδομένων. Η βιβλιογραφία απαρτίζεται από:

- επιστημονικά βιβλία, άρθρα και αναφορές
- μελέτες και χάρτες
- σημειώσεις από προγραμμάτων σπουδών
- εγχειρίδια λειτουργίας μοντέλων προσομοίωσης

και η βάση δεδομένων από:

- χαρτογραφικά-γεωμορφολογικά δεδομένα
- δεδομένα χρήσεων γης
- μετεωρολογικά δεδομένα
- υδρολογικά δεδομένα
- γεωλογικά-υδρογεωλογικά δεδομένα
- οικονομικά δεδομένα

Τόσο η βιβλιογραφία, όσο και η βάση δεδομένων ανανεώνονταν συνέχεια μέχρι το πέρας της διατριβής.

Πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή και η ρύθμιση των μοντέλων προσομοίωσης βασιζόμενες σε ιστορικές χρονοσειρές δεδομένων. Το κάθε μοντέλο ρυθμίστηκε χωριστά, με εξαίρεση το μοντέλο επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας, για τα οποία προέκυψε η βέλτιστη χωρική δομή τους. Για τα δύο μοντέλα που σχετίζονται με τη λειτουργία του ταμιευτήρα της Κάρλας, θεωρήθηκε πως ο τελευταίος υφίστατο στην ιστορική περίοδο. Ως παρατηρούμενες τιμές για τη ρύθμιση αυτών, ελήφθησαν οι προτεινόμενες από τους μελετητές στάθμες του. Το σύστημα των μοντέλων

προσομοίωσης που προέκυψε στηρίζεται στην ανταλλαγή των δεδομένων. Το μοντέλο υπόγειας ροής αποτελεί τον τελικό δέκτη των δεδομένων και τον πυρήνα του συστήματος. Από αυτό το στάδιο αποτυπώθηκε η υδρολογική κατάσταση της λεκάνης της Κάρλας και έγινε εμφανής η κατάσταση υπέρεκμετάλλευσης, στην οποία έχει περιέλθει ο υπόγειος υδροφορέας αυτής.

Η στοχαστική προσομοίωση της υδραυλικής αγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της αβεβαιότητας αυτής και την επίδρασή της τόσο στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όσο και της διαχείρισης. Η στοχαστική προσομοίωση έγινε με τη χρήση γεωστατιστικών μεθόδων, μιας και είναι χωρικά μεταβαλλόμενη στο πεδίο μελέτης. Η εύρεση του βέλτιστου ημιβαριογράμματος προέκυψε από τη σύγκριση των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών της παραμέτρου. Η χρήση των δειγματοληπτικών τιμών της παραμέτρου οδήγησε σε εξαρτημένη προσομοίωση, η οποία αποτελεί ένα μέτρο αύξησης της αξιοπιστίας της στοχαστικής προσομοίωσης. Ένα άλλο μέτρο που εφαρμόστηκε για αυτό τον σκοπό είναι η ρύθμιση του μοντέλου υπόγειας ροής. Αυτά τα δύο μέτρα επέτρεψαν στην παραγωγή όχι ικανού πραγματώσεων της παραμέτρου, ο οποίος ήταν 100. Η SGSIM, η οποία στηρίζεται στις βασικές αρχές της Monte Carlo, επιλέχθηκε για την παραγωγή τους. Στο τέλος πραγματοποιήθηκε έλεγχος αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

Οι πραγματώσεις αυτές εισήχθησαν στο μοντέλο της υπόγειας ροής, το οποίο με τη σειρά του παρήγαγε 100 προσομοιώσεις-απεικονίσεις του υπόγειου υδροφορέα. Πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της αβεβαιότητας της υδραυλικής αγωγιμότητας στα παραγόμενα αποτελέσματα του μοντέλου (υδραυλικά ύψη). Ελέγχθηκε και η αξιοπιστία της προσομοίωσης με τη σύγκριση των μέσων προσομοιωμένων τιμών με τις παρατηρούμενες. Όλα τα υπόλοιπα μοντέλα προσομοίωσης εφαρμόστηκαν ντετερμινιστικά, που σημαίνει πως όλες οι παράμετροι αυτών πρέμειναν σταθερές σε κάθε εφαρμογή.

Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει σαφές ο διαχωρισμών των δύο περιόδων προσομοίωσης της έρευνας. Η πρώτη περίοδος, η ιστορική, αφορά τα έτη από 1987 έως 2012 και η δεύτερη, η διαχειριστική, αφορά τα έτη 2012-2044. Η επιλογή της πρώτης οφείλεται καθαρά στα δεδομένα του μοντέλου υπόγειας ροής που ήταν διαθέσιμα, μιας και το μοντέλο επιφανειακής απορροής εφαρμόστηκε για την περίοδο 1960-2012. Η επιλογή της δεύτερης έγινε με βάση το χρονοδιάγραμμα της μελέτης του έργου της Κάρλας. Για τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιόδου 2012-2044, θεωρήθηκε επανάληψη της προηγούμενης 32ετίας, δηλαδή της περιόδου 1980-2012. Στη διαχειριστική περίοδο περιελήφθησαν στο σύστημα και τα δύο μοντέλα προσομοίωσης που αφορούν τη λειτουργία του ταμιευτήρα (UTHRL, LAK3).

Στη διαχειριστική περίοδο εφαρμόζεται η μέθοδος της βελτιστοποίησης και τα αποτελέσματά της χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της μεθόδου της αξίας της πληροφορίας. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης έχει ως στόχο την άντληση όγκων υπόγειου νερού από «συγκεκριμένες» γεωτρήσεις, που θα οδηγήσουν στο μέγιστο κέρδος από την πώλησή του για την κάλυψη αρδευτικών αναγκών. Οι περιορισμοί αφορούν στην αποκατάσταση του υδροφορέα, με την επάνοδο του υδροφόρου ορίζοντα

σε αποδεκτά επίπεδα. Η λέξη «συγκεκριμένες» δηλώνει εκείνες τις υπό διαχείριση γεωτρήσεις, για τις οποίες η βελτιστοποίηση δε θα δώσει μηδενική παροχή. Πρέπει να ξεκαθαριστεί πως οι υφιστάμενες γεωτρήσεις άντλησης είναι αυτές που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης, μιας και ο αριθμός τους είναι σημαντικός και καλύπτουν όλο το πεδίο μελέτης, γεγονός που δε γεννά την ανάγκη εγκατάστασης νέων. Το τελευταίο θα επιβάρυνε με μεγάλο κόστος τον διαχειριστή. Τέθηκε σαν έτος στόχος το 1987, έτος κατά το οποίο δεν παρατηρούνταν εκμετάλλευση των μη ανανεώσιμων αποθεμάτων του υπόγειου υδροφορέα και δεν είχε ακόμη αρχίσει η πτώση του υδροφόρου ορίζοντα. Επειδή κάθε πρόβλημα συνοδεύόμενο με τις δικούς του περιορισμούς εφαρμόστηκε για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα, εφαρμόστηκε η στηριγμένη στη Monte Carlo μέθοδος στοχαστικής βελτιστοποίησης. Η διαχείριση, όμως, πραγματοποιήθηκε με τη σύζευξη του μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής με το διαχειριστικό μοντέλο. Αποτέλεσμα αυτού του συνδυασμού ήταν οι 100 παραγόμενες βέλτιστες και βιώσιμες στρατηγικές διαχείρισης.

Από αυτό το σημείο ξεκινά η εφαρμογή της αξίας της πληροφορίας της υδραυλικής αγωγιμότητας. Πραγματοποιείται ένας καινοτόμος συνδυασμός για τη διαχείριση των υδατικών πόρων, αυτός της στοχαστικής βελτιστοποίησης με την ανάλυση αποφάσεων. Η αξία της πληροφορίας επεκτείνει την ανάλυση των αποφάσεων στο να εκτιμά τα οφέλη από τη συλλογή επιπλέον πληροφορίας ώστε να μειωθεί ή να απαλειφθεί η αβεβαιότητα από μία συγκεκριμένη χάραξη στρατηγικής διαχείρισης. Το όφελος από την εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι διπλό και προκύπτει από τη μείωση τόσο της οικονομικής όσο και της αραμετρικής αβεβαιότητας. Η μέθοδος στηρίζεται στη στρατηγική λήψης νέας δειγματοληπτικής τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας από το πεδίο, υπό δύο όρους: i) την εύρεση της θέσης εκείνης της νέας τιμής, που θα μειώσει περισσότερο την αβεβαιότητα και ii) το οικονομικό συμφέρον του διαχειριστή, ώστε το κόστος της λήψης αυτής να μην υπερβαίνει τα έσοδα που θα αποκομίσει ο διαχειριστής από την πώληση του αντλούμενου υπόγειου ύδατος. Εδώ, πρέπει να τονισθεί πως αν μη τι άλλο τα κέρδη αυτά επενδύονται για όφελος της βέλτιστης και βιώσιμης διαχείρισης του υπόγειου υδατικού πόρου. Μειώνοντας τόσο την παραμετρική, όσο και την οικονομική αβεβαιότητα μειώνεται το ρίσκο αποτυχίας των στρατηγικών διαχείρισης.

Η μεθοδολογία της αξίας της πληροφορίας στηρίζεται στην ανανέωση του πεδίου τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας με τη χρήση της ανάλυσης Bayes. Επιστρατεύεται η τριών καταστάσεων ανανέωση, που πρώτοι εφάρμοσαν οι Freeze et al., (1992). Η εκ των προτέρων (a priori) κατάσταση στηρίζεται στον αρχικό αριθμό των δειγματοληπτικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας. Στην προ εκ των υστέρων κατάσταση (pre- a posteriori) γίνεται ο έλεγχος της εύρεσης της βέλτιστης θέσης λήψης της νέας τιμής. Η θέση αυτή βρίσκεται εκεί όπου η τιμή της τυπικής απόκλισης των 100 πραγματώσεων της παραμέτρου είναι η μέγιστη σύμφωνα με τον Wagner (1999). Δεν λαμβάνεται η πραγματική δειγματοληπτική τιμή της παραμέτρου, αλλά η μέση τιμή αυτής από τους 100 στοχαστικούς χάρτες. Πραγματοποιείται ανανέωση του πεδίου τιμών και εκτιμάται σύμφωνα με τις αρχές της αξίας της πληροφορίας αν η θεωρητική τιμή αυτή είναι «οικονομικά συμφέρουσα», ώστε να οδηγήσει τον διαχειριστή στην απόφαση να επενδύσει για τη λήψη της πραγματικής τιμής. Στο σημείο αυτό, για

καθαρά συγκριτικούς λόγους, επιλέγεται η θεωρητική τιμή από τη θέση εκείνη με τη δεύτερη μεγαλύτερη τιμή της τυπικής απόκλισης. Η ανάλυση της αξίας της πληροφορίας έδειξε όμως πως η δεύτερη δεν είναι πιο οικονομικά συμφέρουσα από την πρώτη. Έτσι, γίνεται η λήψη της πρώτης νέας δειγματοληπτικής τιμής της παραμέτρου στην εκ των υστέρων κατάσταση. Η λήψη αυτή αλλάζει όλη την υδρογεωλογική πληροφορία, δίνοντας νέο ημιβαριόγραμμα, νέους στοχαστικούς χάρτες της Κ και νέες πραγματώσεις του υπόγειου υδροφορέα, οι οποίες μέσω του προβλήματος βελτιστοποίησης έδωσαν 100 νέες στρατηγικές διαχείρισης. Είναι εμφανής η μείωση τόσο της οικονομικής, όσο και της παραμετρικής αβεβαιότητας. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και τερματίζεται μόνο όταν το κόστος λήψης της νέας τιμής είναι μεγαλύτερο από τα έσοδα της πώλησης του υπόγειου νερού. Τέλος, πραγματοποιείται μια σειρά σύγκρισης των αποτελεσμάτων της στοχαστικής προσομοίωσης, της στοχαστικής βελτιστοποίησης και της αξίας της πληροφορίας για τον έλεγχο και την αξιοπιστία των μεθοδολογιών αυτών.

1.3. Διάρθρωση της διδακτορικής διατριβής

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της διατριβής παρουσιάζοντας το αντικείμενό της και τη διάρθρωσή της. Δίνεται στον αναγνώστη μία συνοπτική περιγραφή της ροής της έρευνας, ώστε να σχηματίσει εξ' αρχής μία γενική εικόνα του όλου προβλήματος. Παρουσιάζονται τέλος τα καινοτόμα στοιχεία της και η συμβολή της στην επιστήμη της υδρολογίας και της διαχείρισης των υδατικών πόρων.

Το δεύτερο κεφάλαιο αφιερώνεται στην αβεβαιότητα που υφίσταται στην προσπάθεια προσομοίωσης των υπόγειων υδάτων. Παρουσιάζονται όλες οι κατηγορίες της αβεβαιότητας που έχουν αντιμετωπιστεί από ερευνητές και μελετητές, μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Αναλύεται διεξοδικά το μαθηματικό υπόβαθρο της στοχαστικής προσομοίωσης και της επιλεχθείσας μεθόδου, της Monte Carlo. Αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου και μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης παρουσιάζονται οι πιο σημαντικές εργασίες που συνέβαλαν στη χρήση της στοχαστικής προσομοίωσης της υδραυλικής αγωγιμότητας σε προβλήματα υπόγειας ροής. Το κεφάλαιο αυτό κλείνει με την εκτενή ανάλυση της γεωστατικής προσέγγισης, η οποία επιστρατεύεται για την προσομοίωση της χωρικής μεταβλητότητας της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Στο τρίτο κεφάλαιο ορίζεται η έννοια της διαχείρισης των υδατικών πόρων, όπως την προσέγγισαν αρκετοί ερευνητές και ακαδημαϊκοί και παρουσιάζονται οι στόχοι της και το ιστορικό της νομοθεσίας. Στη συνέχεια αναλύεται το πρόβλημα της βελτιστοποίησης, το οποίο αποτελεί και το πιο διαδομένο εργαλείο στη διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων. Οι δύο έννοιες είναι πλέον άρρηκτα συνδεδεμένες στα προβλήματα διαχείρισης. Αναλύονται τα είδη αυτής, οι μέθοδοι γραμμικοποίησης των μη γραμμικών προβλημάτων και μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης δίνεται η συμβολή της στη διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων. Γίνεται ιδιαίτερη μνεία για το συνδυασμό των μοντέλων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, για τις μεθόδους γραμμικοποίησης των μη γραμμικών προβλημάτων και για το μητρώο απόκρισης που

εφαρμόζεται στα γραμμικά προβλήματα. Το τελευταίο μέρος του αφιερώνεται στη στοχαστική βελτιστοποίηση και τον συνδυασμό αυτής με την ανάλυση αποφάσεων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μία συνοπτική περιγραφή της ανάλυσης κατά Bayes και μια αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου της αξίας της πληροφορίας. Επειδή η τελευταία ανήκει στην επιστήμη των οικονομικών εφαρμογών, η παρουσίασή της ξεκινά με τη διατύπωση χρήσιμων ορισμών και συνεχίζει με τη συμβολή της στα προβλήματα διαχείρισης των υπόγειων υδατικών συστημάτων, μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Διατυπώνεται καθαρά, σε ποιες εργασίες στηρίχθηκε η εν λόγω έρευνα, αλλά και ποιες διαφοροποιήσεις και καινοτόμα στοιχεία την ξεχωρίζουν από αυτές. Είναι αξιοσημείωτο και πρέπει να ειπωθεί πως έχει βρεθεί μόνο μία εργασία σε παγκόσμιο επίπεδο, η οποία κάνει χρήση της αξίας της πληροφορίας για ποσοτική διαχείριση υπόγειου υδροφορέα, έχοντας όμως κάποιες παραδοχές στην στρατηγική λήψης νέας δειγματοληπτικής τιμής από το πεδίο.

Το πέμπτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην εκτενή περιγραφή της υδρολογικής λεκάνης της λίμνης Κάρλας. Παρουσιάζονται τα κλιματολογικά, υδρολογικά, γεωλογικά, υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της, μαζί με τις χρήσεις γης και τα είδη καλλιεργειών. Επειδή η εν λόγω έρευνα αποσκοπεί στη ρεαλιστική εφαρμογή του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου για τον υπόγειο υδροφορέα σε μελλοντική περίοδο, κρίθηκε σκόπιμη η παρουσία των χαρακτηριστικών της πρώην λίμνης Κάρλας, του ιστορικού της αποξήρανσής της και των έργων ανασύστασής της με τη λειτουργία του ταμιευτήρα αυτής.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα μοντέλα προσομοίωσης, διαχείρισης και γεωστατιστικής, που αποτελούν το προτεινόμενο σύστημα. Γίνεται μια αναλυτική περιγραφή του μαθηματικού τους υποβάθρου, καθώς και των εργαλείων τους, που χρησιμοποιούνται για στην συγκεκριμένη έρευνα. Στο τέλος, αποτυπώνεται η λογική σύζευξης των μοντέλων αυτών, με τη χρήση λογικού διαγράμματος.

Στο έβδομο κεφάλαιο αναπτύσσεται η προσέγγιση της υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης της Κάρλας. Ουσιαστικά, περιγράφεται το πώς δομήθηκε, εφαρμόστηκε και ρυθμίστηκε το σύστημα των μοντέλων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτού για την ιστορική περίοδο αποτυπώνοντας έτσι την υδρολογική κατάσταση της λεκάνης. Η εφαρμογή της Γεωστατιστικής Βιβλιοθήκης έδωσε τη στοχαστική προσομοίωση της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Το όγδοο κεφάλαιο είναι η πεμπουσία της διατριβής, μιας και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της χάραξης στρατηγικών διαχείρισης του υπόγειου υδροφορέα για τη διαχειριστική περίοδο και η εφαρμογή της αξίας της πληροφορίας για τη μείωση τόσο της παραμετρικής, όσο και της οικονομικής αβεβαιότητας. Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στοχαστικής προσομοίωσης του υπόγειου υδροφορέα για το πέρας της διαχειριστικής περιόδου στην περίπτωση μη λήψης διαχειριστικών μέτρων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το πρόβλημα της στοχαστικής βελτιστοποίησης, με την αντικειμενική της συνάρτηση και τους περιορισμούς της. Αποτυπώνεται, μέσω λογικού διαγράμματος, η διαδικασία της αξίας της πληροφορίας και εξάγεται πλήθος αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της, σε ποικίλες μορφές παρουσίασης για την

παραστατικότερη απεικόνιση και σύγκριση αυτών. Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων αποτελεί και τη βάση για την εξαγωγή των συμπερασμάτων.

Στο ένατο και τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των εφαρμογών, κωδικοποιούνται τα κύρια συμπεράσματα της διατριβής και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

1.4. Παρουσίαση των καινοτόμων σημείων της έρευνας

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε, στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, αναπτύσσει και εφαρμόζει ένα εργαλείο προσομοίωσης και διαχείρισης πραγματικών υπόγειων υδατικών συστημάτων. Το εργαλείο αυτό, είναι εμπλουτισμένο με σύγχρονες/καινοτόμες μεθοδολογίες της προσομοίωσης και διαχείρισης και δομήθηκε με άξονα την επιχειρησιακή του εφαρμογή. Επίσης, δεν προσβλέπει μόνο στην προστασία και εξυγίανση των υπόγειων υδατικών πόρων μιας λεκάνης, αλλά αποσκοπεί και στην οικονομική βιωσιμότητα του διαχειριστή, προστατεύοντάς τον από τα οικονομικά ρίσκα που η έλλειψη επαρκούς πληροφορίας υδραυλικών παραμέτρων μπορεί να αποφέρει. Μάλιστα, στο πλαίσιο της λεκάνης της Κάρλας, το εργαλείο αυτό εμπλουτίστηκε με την απαραίτητη πληροφορία του έργου ανασύστασης της λίμνης, ώστε να είναι ρεαλιστικό, για τις ανάγκες της επιχειρησιακής εφαρμογής. Σε πολλά σημεία της διαχείρισης του υπόγειου υδροφορέα δίνει λύσεις για τη χάραξη των στρατηγικών διαχείρισης, οι οποίες δεν προβλέπονται από το έργο ανασύστασης. Μία χαρακτηριστική τέτοια λύση, είναι η επιθυμητή επαναφορά της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα.

Πέραν όμως, από το εξεταζόμενο πεδίο μελέτης, το προτεινόμενο εργαλείο μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε λεκάνη απορροής με στόχο τη βέλτιστη και βιώσιμη διαχείριση του υπόγειου υδατικού συστήματός της. Η βέλτιστη χωρική δομή και η συνδυασμένη ρύθμιση των μοντέλων, που προτείνεται οδηγεί σε ακόμη πιο αξιόπιστες εκτιμήσεις. Το σύστημα των μοντέλων προσομοίωσης εξετάζει, σε επίπεδο λεκάνης, την κατάσταση των υδατικών πόρων αυτής και την αλληλεπίδραση που τους διέπει. Και αυτό γιατί, ένας από τους τελικούς αποδέκτες του κύκλου του νερού μιας λεκάνης απορροής είναι ο υπόγειος υδροφορέας της. Έτσι, ο διαχειριστής έχει μια καθαρή εικόνα της υδατικής κατάστασης της λεκάνης, η οποία ρυθμίζει σημαντικά το υδατικό ισοζύγιο του υπόγειου υδατικού συστήματός της. Αυτό απαιτεί έναν μεγάλο όγκο πληροφορίας, στον οποίο στηρίζονται τα μοντέλα προσομοίωσης.

Από την άλλη, πραγματοποιείται μία καινοτόμος μεθοδολογία ανάλυσης της αβεβαιότητας μίας υδρογεωλογικής παραμέτρου του υπόγειου υδροφόρου συστήματος. Τέτοιου είδους αναλύσεις δεν έχουν ακόμη καθιερωθεί σε επίπεδο επιχειρησιακής εφαρμογής, μιας και στην πλειοψηφία τους τα περισσότερα διαχειριστικά εργαλεία δεν λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα. Το προτεινόμενο όμως εργαλείο, θέλοντας να προστατέψει το διαχειριστή από το ρίσκο που η αβεβαιότητα γεννά, κάνει χρήση της στοχαστικής προσομοίωσης και διαχείρισης του υπόγειου υδροφορέα. Βέβαια, στη θέση της υδραυλικής αγωγιμότητας μπορεί να εξετάζεται άλλη παράμετρος, ή άλλο

δεδομένο του μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής. Η συμβολή της στοχαστικής διαχείρισης έγκειται, μέσω του προβλήματος βελτιστοποίησης, και στην εκτίμηση της οικονομικής αβεβαιότητας. Στις μέρες μας, για να μπορέσει η διαχείριση ενός υδατικού πόρου να είναι βιώσιμη, πρέπει να είναι και βέλτιστη. Αυτό σημαίνει πως πρέπει να εφαρμοστεί εκείνη η στρατηγική διαχείρισης, η οποία θα προστατέψει το περιβάλλον, αλλά με το μικρότερο δυνατό κόστος, ώστε εκτός από ωφέλιμη να είναι και ρεαλιστική. Αυτό ακριβώς λαμβάνει υπόψη το προτεινόμενο εργαλείο.

Η συμβολή του όμως δεν σταματά εδώ. Πέρα από τις βέλτιστες στρατηγικές διαχείρισης που προτείνει, προχωρά την έρευνα ένα βήμα παραπάνω, με την εφαρμογή της αξίας της πληροφορίας. Με δεδομένη την παραμετρική αβεβαιότητα, εφαρμόζεται μία στρατηγική λήψης νέων τιμών της εν λόγω παραμέτρου, ώστε η αβεβαιότητα να μειωθεί σε τέτοιο βαθμό, που να μη ζημιώνει οικονομικά το διαχειριστή, μέσω του ρίσκου που προκαλεί. Το υπόψη ρίσκο δε δύναται να αποτυπωθεί χωρίς τη χρήση της στοχαστικής προσομοίωσης, δηλαδή με τη χρήση μίας μόνο ντετερμινιστικής απεικόνισης της κατάστασης του υπόγειου υδροφορέα και την συνακόλουθη επιλογή μίας μόνο στρατηγικής διαχείρισης. Και αυτό γιατί, όταν υπάρχει ο σχεδιασμός της άντλησης «επιτρεπόμενου» υπόγειου ύδατος προς πώληση από τον διαχειριστή για την κάλυψη κυρίως αρδευτικών αναγκών, τότε η μία λύση (έστω και μέση λύση) επιφέρει και περιβαλλοντική και οικονομική ζημιά. Περιβαλλοντική, διότι μπορεί η μέση τιμή να είναι η αντιπροσωπευτικότερη, αλλά δεν σημαίνει πως είναι και η σωστή. Έτσι, μπορεί στο πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο θα βρίσκει τον «επιτρεπόμενο» αντλούμενο όγκο, ώστε να μην αντλούνται τα μη ανανεώσιμα αποθέματα, η πραγματική τιμή των υδραυλικών υψών να είναι μικρότερη από τη μέση, με αποτέλεσμα αυτό να δίνει μεγαλύτερο όγκο νερού προς άντληση, αλλά μέσα σε αυτόν να εμπεριέχονται και μόνιμα αποθέματα. Οικονομική, γιατί αν η πραγματική τιμή του υδραυλικού ύψους είναι μεγαλύτερη από τη μέση τιμή, τότε το πρόβλημα της βελτιστοποίησης θα δώσει μικρότερο «επιτρεπόμενο» αντλούμενο όγκο νερού προς πώληση και ο διαχειριστής θα έχει λιγότερα έσοδα. Κρίνοντας τα αποτελέσματα καθαρά από την άποψη της προσομοίωσης, μπορεί κανείς να πει πως αποκλίσεις των ενός ή των δύο μέτρων μπορούν να γίνουν ανεκτές. Από την άποψη όμως της διαχείρισης, και δη της οικονομικής έστω και το ένα μέτρο απόκλιση ισοδυναμεί με 500 hm³ ύδατος για όλη την περιοχή μελέτης, γεγονός που καθιστά την οικονομική αβεβαιότητα αρκετά σημαντική, και τη στοχαστική προσομοίωση και διαχείριση ως τη μόνη λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος της αβεβαιότητας.

Όλες οι παραπάνω μεθοδολογίες, ελέγχθηκαν στο αν τα αποτελέσματα τους είναι αξιόπιστα και ικανοποιούν τους στόχους, που αυτές έθεσαν. Εν τέλει, όλες οι βέλτιστες στρατηγικές διαχείρισης επανέφεραν με επιτυχία τη στάθμη του υπόγειου υδροφορέα στο επιθυμητό ύψος. Η καμπύλη αξιοπιστίας για την κάθε στρατηγική διαχείρισης αποτελεί το κριτήριο επιλογής εκείνης της στρατηγικής που ο λήπτης απόφασης θα αξιολογήσει ως περιβαλλοντικά και οικονομικά συμφέρουσα. Αυτή η δυνατότητα επιλογής αποτελεί και την επιτομή του προτεινόμενου εργαλείου. Έτσι, ο διαχειριστής δεν περιορίζεται μόνο σε μία στρατηγική διαχείρισης, την οποία αναγκαστικά θα

επιλέξει, αλλά του παρέχεται μία γκάμα ίσης πιθανότητας στρατηγικών λύσεων, ώστε να έχει την επιλογή να κρίνει ποια απ' όλες θα επιλέξει.

2. Η ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Η αβεβαιότητα είναι έμφυτο χαρακτηριστικό του αντικειμενικού κόσμου και είναι ευρέως παρούσα τόσο στη φύση, όσο και στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Οποιαδήποτε προσπάθεια κατανόησης που καταβάλει ο άνθρωπος για να περιγράψει τη φύση εμπεριέχει αβεβαιότητα. Το ίδιο συμβαίνει και με τους υδατικούς πόρους και δη τους υπόγειους και οι λόγοι παρουσιάζονται ευθύς αμέσως. Τα υπόγεια υδατικά συστήματα είναι περίπλοκα και ανοιχτά συστήματα, τα οποία επηρεάζονται από τις υδρολογικές και μετεωρολογικές καταστάσεις, τις γεωλογικές δομές, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά, τη βλάστηση και τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Επιπλέον, κάποιες ιδιότητες των υπόγειων υδατικών συστημάτων δε μπορούν να μετρηθούν απ' ευθείας π.χ. υδραυλική αγωγιμότητα και μεταφορικότητα, των οποίων η ετερογένεια μεταβάλλεται σημαντικά μέσα στο πεδίο τους, εκτιμώνται έμμεσα αναλύοντας μετρήσεις πεδίου (Hassan et. al., 2009). Καθώς οι φυσικές υδρολογικές διαδικασίες ή η κίνηση του υπόγειου νερού περιγράφονται από ένα σύνολο εξισώσεων, οι προβλέψεις των υπόγειων υδατικών συστημάτων αποκλίνουν πάντα από τις παρατηρήσεις.

Η αριθμητική προσομοίωση των υπόγειων υδάτων αποτελεί τη βάση για την ποσοτική ανάλυση των υπόγειων υδατικών πόρων. Η επιτυχής εκτίμηση των υπόγειων υδάτων εξαρτάται από αξιόπιστες και σταθερές προσομοιώσεις. Η ρύθμιση και η πιστοποίηση προσδίδουν αξιοπιστία στην προσομοίωση, χωρίς αυτό να σημαίνει πως με την επιτυχή χρήση των δύο παραπάνω εργαλείων, εξαλείφεται η αβεβαιότητα. Επιπλέον, ως αποτέλεσμα της αβεβαιότητας στην προσομοίωση των υπόγειων υδατικών συστημάτων, οι διαχειριστές πρέπει να συμπεριλάβουν το ρίσκο της αποτυχία στη λήψη αποφάσεων (Zeng et. al., 2012).

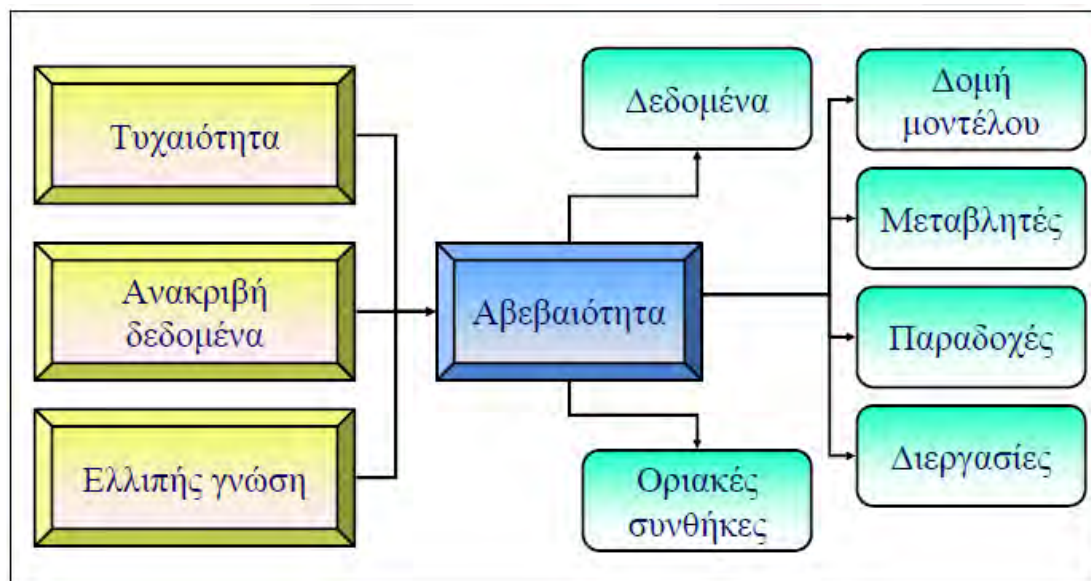
2.1. Κατηγοριοποίηση της αβεβαιότητας

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των υπόγειων νερών εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως π.χ. τα σφάλματα τα οποία προκύπτουν από την κατασκευή των εννοιολογικών μοντέλων και τις αποκλίσεις που προκύπτουν από την προσεγγιστική λύση των μαθηματικών μοντέλων. Επιπλέον, η έλλειψη και η εσφαλμένη παρατήρηση/καταμέτρηση των δειγματοληπτικών τιμών των δεδομένων επιτείνουν περαιτέρω την αβεβαιότητα προσομοίωσης. Η αλληλεπίδραση και η συνύπαρξη όλων των παραπάνω, καθιστούν δύσκολο να ξεχωρίσει κάποιος το κάθε είδος της πηγής της αβεβαιότητας αποκλειστικά και να το περιγράψει ανεξάρτητα από τα άλλα.

Οι πηγές της αβεβαιότητας στην προσομοίωση επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας έχουν κατηγοριοποιηθεί από διάφορους συγγραφείς, αλλά με διαφοροποιήσεις μεταξύ τους. Ο Beck (1983) διέκρινε την αβεβαιότητα ως εξής: 1) αβεβαιότητα λόγω σφαλμάτων στις μετρήσεις πεδίου, 2) αβεβαιότητα λόγω ελλιπούς πληροφορία, 3) αβεβαιότητα λόγω της σχέσης ανάμεσα στις παραμέτρους και 4) αβεβαιότητα λόγω της εκτίμησης των παραμέτρων ενός μοντέλου. Οι Yen et. al. (1986) χώρισαν την

αβεβαιότητα σε πέντε κατηγορίες: 1) στη φυσική αβεβαιότητα που προκαλείται από την έμφυτη τυχαιότητα των φυσικών διεργασιών, 2) στην αβεβαιότητα του μοντέλου, που προκύπτει από προβληματικά μοντέλα, τα οποία δεν είναι έτοιμα ή σωστά δομημένα από το χρήστη να αναπαραστήσουν τις φυσικές διεργασίες, 3) στην αβεβαιότητα των παραμέτρων, 4) στην αβεβαιότητα των δεδομένων που προκύπτει από τη λανθασμένη καταγραφή τους και 5) στη λειτουργική αβεβαιότητα που προκύπτει από ανθρωπογενείς παράγοντες. Ο Bernier (1987) διαχώρισε την αβεβαιότητα σε: 1) φυσική που σχετίζεται με τις τυχαίες φυσικές διαδικασίες και 2) τεχνολογική, η οποία εμπεριέχει τα σφάλματα δειγματοληψίας και την αβεβαιότητα του μοντέλου. Ο Van Asselt (2000) πρότεινε μια κατηγοριοποίηση βασισμένη στη στήριξη αποφάσεων της διαχείρισης των μοντέλων υπόγειας ροής, με τις πηγές της αβεβαιότητας να χωρίζονται σε τρία επίπεδα: 1) παραγωγής θέσης, 2) επίπεδο διαχείρισης και 3) φυσικής ποιότητας. Οι Liu και Shu (2008) κατηγοριοποίησαν την αβεβαιότητα, σύμφωνα με την προέλευσή της σε: 1) στοχαστική, 2) ασαφής, 3) γκρι και 4) άγνωστη. Επιπλέον, ανάλογα με το λόγο που την προκαλεί, η αβεβαιότητα μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε: 1) αβεβαιότητα που προέρχεται από τις φυσικές διεργασίες, 2) αβεβαιότητα που προέρχεται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες και 3) αβεβαιότητα που προέρχεται από την ικανότητα αντίληψης του χρήστη/διαχειριστή. Οι Merz και Thieken (2009) αντιμετώπισαν την αβεβαιότητα της προσομοίωσης με δύο τύπους: 1) την τυχαία/κυβευτική και 2) τη γνωσιολογική.

Όπως γίνεται αντιληπτό, τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί σημαντικά ο αριθμός των ερευνητών που ασχολούνται με την αβεβαιότητα της προσομοίωσης των υπόγειων υδατικών συστημάτων. Προκειμένου να ληφθούν απλοποιημένα και λογικά στατιστικά για την εκτίμηση της αβεβαιότητας και να ικανοποιηθούν πραγματικές ανάγκες των υδρογεωλόγων ερευνητών/μηχανικών, όλο και περισσότεροι ερευνητές (Hassan et. al., 2008; Rojas et. al., 2008; Jin et. al., 2010; Renard et. al., 2010; Wu et. al., 2011; Zeng et. al., 2013) αποδέχτηκαν ένα κοινό πλαίσιο για την ανάλυση της αβεβαιότητας στην προσομοίωση των υπόγειων υδάτων. Σύμφωνα με τη λογική διαδικασία της προσομοίωσης των υπόγειων υδάτων, η αβεβαιότητα απορρέει από τρεις γενικές πηγές οι οποίες είναι: 1) τα δεδομένα, 2) η εννοιολογική προσέγγιση του μοντέλου και 3) οι παράμετροι του μοντέλου. Οι πηγές αυτές, όμως, είναι χαρακτηριστικά της ενδογενούς αβεβαιότητας. Τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά της εξωγενούς είναι δύσκολο να αντιμετωπιστούν από τη φύση τους μιας και στην περίπτωση αυτή η αβεβαιότητα σχετίζεται με το περιβάλλον του συστήματος, δηλαδή με τους παράγοντες που δεν περιλαμβάνονται στο μοντέλο και που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης. Το παρακάτω Σχήμα αναπαριστά σε γενικές γραμμές την αβεβαιότητα στην προσομοίωση.



Σχήμα 2. 1. Γραφική αναπαράσταση της κατηγοριοποίησης της αβεβαιότητας στην προσομοίωση.

Τέλος ορισμένοι συγγραφείς (Rojas et. al., 2010; Ye et. al., 2010), θεωρούν την αβεβαιότητα των οριακών συνθηκών, ως την τέταρτη κατηγορία αβεβαιότητας, την οποία αποκαλούνως αβεβαιότητα σεναρίου. Οι Wu et. al. (2011) θεωρούν ως τέταρτη κατηγορία αβεβαιότητας τη δομή των μοντέλων, καθώς είναι επιρρεπής σε σφάλματα κατά την επίλυση της εξίσωσης της υπόγειας ροής.

2.2. Μέθοδοι ανάλυσης της αβεβαιότητας

Σύμφωνα με τις δομές των δεδομένων ενός συστήματος, η πιο άμεση μέθοδος για την εκτίμηση της παραγόμενης αβεβαιότητας είναι να υπολογισθούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των αποτελεσμάτων του μοντέλου (Montanari, 2007). Όμως, αυτή η προσέγγιση έχει δύο περιορισμούς: 1) τον φόρτο των απαιτούμενων μαθηματικών και στατιστικών λύσεων και 2) την αδυναμία εξαγωγής ακριβέστερων και αναλυτικότερων στατιστικών αποτελεσμάτων λόγω έλλειψης των δειγματοληπτικών τιμών των δεδομένων.

Η θεωρία των πιθανοτήτων είναι η παραδοσιακά πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος ανάλυσης της αβεβαιότητας των υδρολογικών διαδικασιών και όχι μόνο. Πρόσφατα, αρκετοί ερευνητές (Zadeh, 2005; Montanari, 2007) συμπέραναν ότι η αβεβαιότητα μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά με μια πιο ευρεία προοπτική με την στατιστική πληροφορία να αποτελεί όντως χρήσιμο εργαλείο. Αυτό βασίζεται στην παραδοχή ότι η εκτίμηση της αβεβαιότητας δεν πρέπει να περνάει μόνο μέσα από αυτές τις δύο μεθόδους, αλλά να δίνεται στον ερευνητή η δυνατότητα να την αποτιμά και με άλλους όρους πέραν των μαθηματικών, όπως είναι οι οικονομικοί, οι περιβαλλοντικοί, οι οικολογικοί, οι κοινωνικοί κ.α. καθώς πάρα πολλές έρευνες πάνω στην υδρολογία έχουν τον αντίκτυπο τους και σε αυτούς τους τομείς. Κάτι αντίστοιχο επιχειρείται και

στην παρούσα ερευνητική εργασία, όπου η αβεβαιότητα της υδραυλικής παραμέτρου και η μείωση της αβεβαιότητας αυτής αποτιμώνται και με οικονομικούς όρους.

2.2.1. Ανάλυση της αβεβαιότητας των παραμέτρων του μοντέλου

Η κατάρτιση ενός μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής απαιτεί, ως μια κατηγορία δεδομένων, ένα σύνολο από παραμέτρους οι οποίες μεταβάλλονται χωρικά ή/και χρονικά όπως π.χ. η υδραυλική αγωγιμότητα, η διαπερατότητα, η ειδική αποθηκευτικότητα, η ειδική απόδοση και η διασκορπισσιμότητα. Τα υδρογεωλογικά δεδομένα είναι πάντα περιορισμένα στο πεδίο και επιπλέον η αβεβαιότητα των παραμέτρων επηρεάζεται και από την επίδραση της κλίμακας ανάμεσα στις σημειακές μετρήσεις και στο μέγεθος του πεδίου μελέτης (Beckie, 1996). Η επίδραση της κλίμακας των παραμέτρων είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη χωρική τους μεταβλητότητα ως εξής: οι υδραυλικές ιδιότητες χαρακτηρίζονται γενικά από άγνωστη χωρική ανομοιογένεια λόγω της τοπικής γεωλογικής ανομοιογένειας. Αυτή η τοπική χωρική ανομοιογένεια συνήθως αγνοείται στα μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής, μιας και η χωρική διάσταση ενός κελιού του πλέγματος, στο οποίο λύνεται η εξίσωση της κίνησης του νερού είναι της τάξεως των δεκάδων ή εκατοντάδων μέτρων (Refsghaard et. al., 2012). Από την άλλη όμως δεν θα ήταν εφικτή η προσομοίωση πραγματικών, μεγάλης κλίμακας υδροφορέων με κελιά ισοδιάστασης κάτω του μέτρου λόγω του τεράστιου όγκου δεδομένων, τον οποίο η στοχαστική προσομοίωση θα έκανε ακόμη μεγαλύτερο. Για υδροφορείς με εξιδανικευμένες συνθήκες, ο Gelhar (1986) παρουσίασε αναλυτικά ότι η αβεβαιότητα στην εκτίμηση των υδραυλικών υψών εξαιτίας της μη υπολογιζόμενης τοπικής ανομοιογένειας είναι συνάρτηση της υδραυλικής κλίσης καθώς και της διακύμανσης και του μήκους συσχέτισης της τοπικής όμως υδραυλικής αγωγιμότητας.

Η επιλογή των σωστών και ικανοποιητικών σε αριθμό δεδομένων των παραμέτρων ενός μοντέλου αποτελεί μια από τις πιο επίπονες και σημαντικές έγνοιες που πρέπει να αντιμετωπίσει ο χρήστης. Επιπροσθέτως τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εξαρτώνται κυρίως από τις παραμέτρους, εφόσον η εννοιολογική προσέγγιση έχει δομηθεί. Και όσο σωστά δομημένη και να είναι η εννοιολογική υπόσταση του μοντέλου, αν οι παράμετροι δεν έχουν ορισθεί/προσεγγισθεί σωστά, τα αποτελέσματα θα περιέχουν μεγάλη αβεβαιότητα, μέχρι και στο σημείο να είναι λάθος. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την στοχαστική αντιμετώπιση αυτού του είδους αβεβαιότητας, αναλύονται παρακάτω.

2.2.2. Ανάλυση αβεβαιότητας του εννοιολογικού μοντέλου

Το εννοιολογικό μοντέλο αποτελεί τη βάση για την επίλυση των εξισώσεων. Δηλαδή με άλλα λόγια το εννοιολογικό μοντέλο ή αλλιώς εννοιολογική προσέγγιση συνθέτει την αρχιτεκτονική του υπόγειου υδατικού συστήματος και υπαγορεύει στο μαθηματικό μοντέλο ποιες εξισώσεις θα επιλύσει ανάλογα με τις υδρογεωλογικές διεργασίες που συμβαίνουν. Όμως αυτές οι υδρογεωλογικές διαδικασίες πάντα απλοποιούνται,

ανακαλώντας παραδοχές, με αποτέλεσμα τη πρόκληση αβεβαιότητας (Rojas et. al., 2008; Refsgaard et. al., 2012). Οι υδρογεωλογικές αυτές διαδικασίες επηρεάζονται από τη θέση, τον τύπο, την επιλογή των κατακόρυφων γεωλογικών στρωμάτων ενός υπόγειου υδροφορέα, καθώς και με τις αρχικές και οριακές συνθήκες.

Οι ερευνητές δεν έχουν, μέχρι σήμερα, δώσει την πρέπουσα προσοχή στην αβεβαιότητα της εννοιολογικής προσέγγισης/δομής των μοντέλων υπόγειας ροής. Συνήθως, τα υπόγεια υδατικά συστήματα αναπαριστώνται από ένα μόνο υδρογεωλογικό εννοιολογικό μοντέλο (Rojas et. al., 2008). Συνεπώς, μη χρησιμοποιώντας και άλλα μοντέλα, είναι αναπόφευκτο να υπεισέρχεται αβεβαιότητα στην προσομοίωση. Ο Bredehoeft (2005) υποστήριξε ότι η ορθότητα ενός εννοιολογικού μοντέλου δεν εξαρτάται μόνο από τη ρύθμιση του. Βασιζόμενος σε ένα συνθετικό μοντέλο υπόγειας ροής, έδειξε πως το 5%-30% της αβεβαιότητας της πρόβλεψης προέρχεται από την εννοιολογική δομή του μοντέλου. Η μέθοδος της πολλαπλής απεικόνισης ενός εννοιολογικού μοντέλου με τη χρήση της γεωστατιστικής αποτελεί μια σταθερή και ευρέως διαδομένη μέθοδο, όπως είναι π.χ. το εργαλείο TProGS του Carle (1996), το οποίο περιέχεται σε πολλά εμπορικά μοντέλα προσομοίωσης. Όμως, η μέθοδος της χρήσης πολλών εννοιολογικών μοντέλων έχει ολοένα και μεγαλύτερη απήχηση (Rojas et. al., 2008; Trolborg et. al., 2007). Κατά συνέπεια, η συμπεριφορά ενός υπόγειου υδροφορέα περιγράφεται από ένα συνδυασμό αποτελεσμάτων προερχόμενα από εναλλακτικά μοντέλα. Σε γενικές γραμμές, η πολύ-μοντελική ανάλυση περιέχει τα παρακάτω βήματα: 1) κατασκευή ενός συνόλου εύλογων εννοιολογικών μοντέλων βασιζόμενα στην αρχική πληροφορία, 2) ρύθμιση αυτών των εναλλακτικών εννοιολογικών μοντέλων με βάση τις εξαρτημένες τιμές (conditioning data), 3) στάθμιση ή κατάταξη αυτών των μοντέλων με τη χρήση κριτηρίων, 4) αφαίρεση των μοντέλων που παρουσίασαν σημαντικά λανθασμένη συμπεριφορά και 5) εξαγωγή προβλέψεων συνδυάζοντας τις σταθμισμένες προβλέψεις των εναπομεινάντων εννοιολογικών μοντέλων. Οι μέθοδοι που έχουν επιστρατευθεί για την ανάλυση αυτού του είδους αβεβαιότητας είναι οι εξής: Η μέθοδος Bayesian Model Averaging (BMA) μέθοδος, η οποία προτάθηκε από τους Draper (1995) και Kass et. al. (1995). Μια παραλλαγή αυτής, η μέθοδος Expectation Maximization BMA (EM-BMA) προτάθηκε από τους Raftery et. al. (2005). Τέλος οι μέθοδοι Monte Carlo – BMA και Information Criteria-BMA χρησιμοποιήθηκαν και παράλληλα τροποποιήθηκαν από πολλούς ερευνητές (Neuman and Wierenga, 2003; Singh et. al., 2010; Ye et. al., 2010; Foglia et. al., 2013).

2.2.3. Ανάλυση αβεβαιότητας των παρατηρούμενων δεδομένων

Όσον αφορά τα δεδομένα, πρέπει να τονιστεί πως οι δειγματοληπτικές τιμές των δεδομένων αξιοποιούνται κυρίως για δύο σκοπούς: 1) για τη χρήση τους ως δεδομένα κατάρτισης των αρχικών συνθηκών (π.χ. παρατηρούμενα υδραυλικά ύψη) και δόμησης του μοντέλου (π.χ. υδρογεωλογικές παράμετροι) και 2) για τη χρήση τους ως δεδομένα παρατήρησης στη ρύθμιση του μοντέλου (π.χ. παρατηρούμενα υδραυλικά ύψη) και εξάρτησης για το σκοπό της εξαρτημένης στοχαστικής προσομοίωσης ή ανανέωσης του

πεδίου τιμών παραμέτρων με τη χρήση της ανάλυσης Bayes (π.χ. υδρογεωλογικές παράμετροι).

Τα σφάλματα παρατήρησης περιέχουν συστηματικά και τυχαία σφάλματα, τα οποία παράγονται κατά τη διαδικασία της μέτρησης, συλλογής, καταγραφής, αποθήκευσης και εισαγωγής τους στα μοντέλα. Όταν ένα μοντέλο ρυθμίζεται και επαληθεύεται βασιζόμενο σε ένα σύνολο δεδομένων παρατήρησης, η αβεβαιότητα που σχετίζεται με τα αποτελέσματα του μοντέλου, τις προβλέψεις κ.α. θεωρείται ως σφάλμα παρατήρησης. Εξάλλου, τα σφάλματα παρατήρησης είναι πάντα άμεσα συνδεδεμένα με την αβεβαιότητα των παραμέτρων και την εννοιολογική αβεβαιότητα και επιπλέον είναι δύσκολο να διαχωριστούν από αυτές. Για το λόγο αυτό, η ανάλυση αυτού του τύπου αβεβαιότητας έχει δεχθεί λιγότερη προσοχή από τους ερευνητές σε σχέση με τους άλλους δύο τύπους. Τα δεδομένα παρατήρησης, ως επί τον πλείστον, θεωρούνται ακριβή, ή χαρακτηρίζονται από απλές δομές σφαλμάτων (Post et. al., 2008; Renard et. al., 2010). Επιπλέον, τα υπόγεια υδατικά συστήματα είναι από τη φύση τους πολύπλοκα και ιδιαίτερα, όπου τα σφάλματα των μετρήσεων/παρατηρήσεων εξαρτώνται από ποικίλους παράγοντες. Η έλλειψη δεδομένων αποτελεί ένα ειδικό παράγοντα που δεν έχει επίπτωση μόνο στην αβεβαιότητα των δεδομένων, αλλά και σε όλες τις μορφές αβεβαιότητας καθώς τις επηρεάζει άμεσα. Ως εκ τούτου, τα τυχαία σφάλματα συνήθως θα έχουν μια πολύπλοκη δομή η οποία είναι δύσκολο να περιγραφεί ή να εξηγηθεί. Προς το παρόν, η αβεβαιότητα της παρατήρησης εκτιμάται με τη χρήση αναλυτικών μεθόδων εκτίμησης βασιζόμενες στην ανάλυση Bayes. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι είναι η Bayesian Forecasting System (BFS), η οποία προτάθηκε από τον Krzysztofowicz (1999), η Integrated Bayesian Uncertainty Estimator (IBUNE) των Ajami et.al. (2007) και η Bayesian Total Error Analysis (BATEA), η οποία προτάθηκε από τους Kravetski et. al. (2006a,b).

2.3. Στοχαστική προσομοίωση των υπόγειων υδάτων

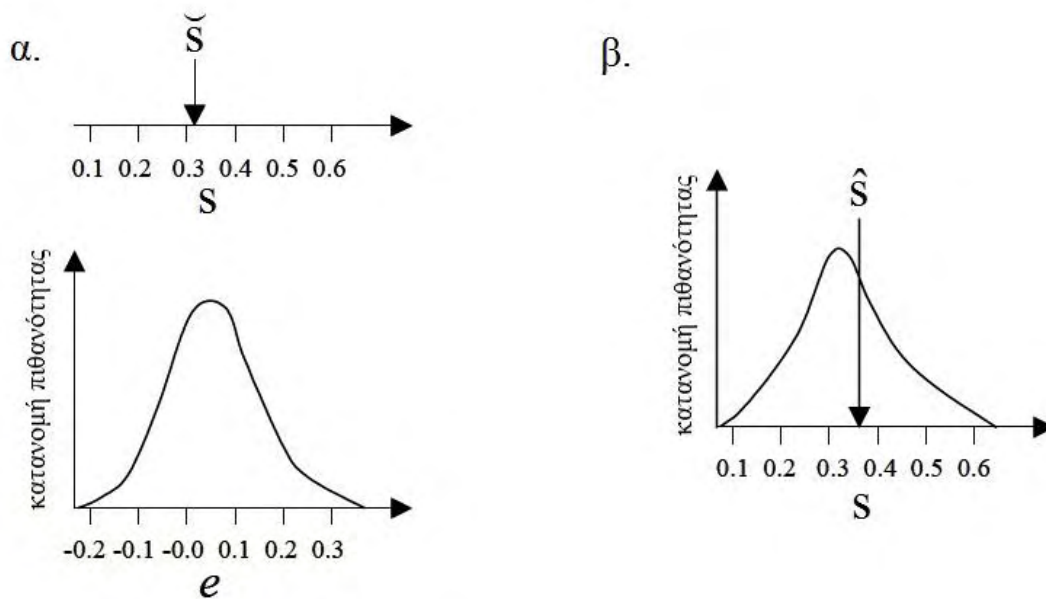
Ο όρος «στοχαστικός» είναι καθαρά ελληνικής προέλευσης και προέρχεται από το ουσιαστικό «στοχαστής», που σημαίνει αυτός που σκέφτεται θεωρητικά ζητήματα, θέματα υψηλού προβληματισμού σχετικά με τον άνθρωπο, τη ζωή και την κοινωνία και επιπλέον με εφόδιο αυτή τη σκέψη έχει την ικανότητα να εκτιμά την μελλοντική κατάσταση των πραγμάτων, δηλαδή να προβλέπει το μέλλον. Η ορολογία αυτή στηρίχθηκε στη δευτερεύουσα έννοια της λέξης που αφορά την πρόβλεψη. Ως εκ τούτου, η έννοια της στοχαστικής προσομοίωσης έγκειται στο να μπορεί να εκτιμά/προβλέπει τιμές μιας μεταβλητής στο χώρο ή στο χρόνο, όταν αυτές δεν υπάρχουν ή είναι ελλιπείς, ώστε να αποφεύγονται τα σφάλματα που προκαλεί η αβεβαιότητα. Υπάρχουν δύο ξεχωριστοί τρόποι αντιμετώπισης των σφαλμάτων της προσομοίωσης της υδρολογίας:

Ντετερμινιστική προσομοίωση: Συνήθως ο μελετητής γνωρίζει τα σφάλματα, τα οποία αντιμετωπίζει ρυθμίζοντας το μοντέλο. Κατά τη διαδικασία αυτή αναζητά τις βέλτιστες δομές του μοντέλου, ώστε τα αποτελέσματά του να συγκλίνουν στις παρατηρούμενες τιμές. Η ρύθμιση όμως ενός μοντέλου, όσο επιτυχής και να είναι δε σημαίνει και την

απάλειψη των σφαλμάτων από την προσομοίωση. Εννοείται ότι η επιτυχής ρύθμιση προσδίδει αξιοπιστία στο μοντέλο, αλλά αυτό που κάνει είναι να «ρυθμίσει» τις ιδιότητες και τις παραμέτρους με βάση μια μονοσήμαντη κατάσταση του μοντέλου, η οποία περιγράφεται από τα διαθέσιμα που είναι, ως επί τον πλείστον ελλιπή. Τα σφάλματα συνεχίζουν να υφίστανται και μάλιστα στη περίπτωση της πρόβλεψης μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Στοχαστική προσομοίωση: Στόχος της δεν είναι μόνο να παράγει/εκτιμήσει τιμές για μια μεταβλητή, αλλά και να ποσοτικοποιήσει τα σφάλματα των αποτελεσμάτων. Εννοείται, πως στην πράξη, οι τιμές των σφαλμάτων των αποτελεσμάτων δεν είναι γνωστές. Αυτό που είναι γνωστό, από τις διαθέσιμες μετρήσεις είναι οι κατανομές πιθανοτήτων των σφαλμάτων, οι οποίες δηλώνουν πόσο πιθανό είναι ένα σφάλμα να έχει μια συγκεκριμένη τιμή.

Για να γίνει πιο ξεκάθαρη αυτή η διαφορά, παρουσιάζεται ένα απλό πρόβλημα στο Σχήμα 2.2. Έστω μια μεταβλητή s , η τιμή της οποίας υπολογίζεται από ένα μοντέλο προσομοίωσης. Το αποτέλεσμα του μοντέλου δηλώνεται ως \hat{s} , οπότε το σφάλμα εκτίμησης θα ισούται με $e = \hat{s} - s$. Επειδή δε γνωρίζουμε ακριβώς την τιμή του σφάλματος, το θεωρούμε ως τυχαία μεταβλητή E , για την οποία όμως γνωρίζουμε την πιθανότητα κατανομής. Επομένως, στην περίπτωση της ντετερμινιστικής προσομοίωσης, οι προσπάθειες θα αποδώσουν μόνο την τιμή \hat{s} , ενώ στην στοχαστική προσομοίωση, θα αποδοθεί η τιμή \hat{s} και η κατανομή πιθανότητας του τυχαίου σφάλματος E . Οι περισσότερες μέθοδοι της στοχαστικής προσομοίωσης δεν λαμβάνουν υπόψη τα σφάλματα στα αποτελέσματα του μοντέλου. Αντί για αυτό υποτίθεται πως η μεταβλητή s , είναι μια τυχαία μεταβλητή S . Αυτό σημαίνει πως αντιμετωπίζεται σα μια τυχαία μεταβλητή για την οποία δεν γνωρίζουμε την τιμή, αλλά μπορούμε να υπολογίσουμε την κατανομή πιθανότητάς της. Η κατανομή πιθανότητας του Σχήματος 2.2 μας πληροφορεί πως, παρόλο που δε γνωρίζουμε την ακριβή τιμή της μεταβλητής, ξέρουμε πως είναι πιο πιθανό να βρίσκεται κοντά στο 0.3, παρά στο 0.2 ή στο 0.5. Μοντέλα τα οποία παρέχουν κατανομές πιθανοτήτων των μεταβλητών αντί για συγκεκριμένες τιμές ονομάζονται στοχαστικά μοντέλα. Στηριζόμενος στην κατανομή πιθανότητας, είναι συνήθως δυνατό να προσεγγίσει κανείς μια «καλή πρόβλεψη \hat{s} », η οποία είναι ίση με τη μικρότερη μέση τιμή των σφαλμάτων. Η τιμή της καλύτερης πρόβλεψης δεν είναι απαραίτητο να ισούται με την τιμή του ντετερμινιστικού μοντέλου \hat{s} .



Σχήμα 2. 2. Προσέγγιση μια τιμής μιας μεταβλητής μέσω: α. της ντετερμινιστικής προσομοίωσης και β. της στοχαστικής προσομοίωσης.

2.3.1. Στατιστική επεξήγηση της στοχαστικής προσομοίωσης

Έστω $U(x)$ μια στοχαστική διαδικασία. Εάν αυτή η διαδικασία αναφέρεται στον χώρο τότε για μια συγκεκριμένη τιμή x , η $U(x)$ είναι μια τυχαία μεταβλητή με την εξής αθροιστική συνάρτηση κατανομής:

$$F_U(u, x) = P[U(x) \leq u] \quad (2.1)$$

όπου $P[U(x) \leq u]$ είναι η πιθανότητα να είναι η $U(x)$ μικρότερη από την που u στη συγκεκριμένη θέση x . Φαίνεται από την παραπάνω εξίσωση πως η αθροιστική συνάρτηση κατανομής εξαρτάται από το x . Αυτή η αθροιστική συνάρτηση κατανομής ονομάζεται ενός σημείου κατανομή της στοχαστικής διαδικασίας (τυχαίο πεδίο) $U(x)$. Η ενός σημείου συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της $U(x)$ δίνεται από την σχέση:

$$p_u(u, x) = \frac{\partial F_U(u, x)}{\partial u} \quad (2.2)$$

Η δύο σημείων αθροιστική συνάρτηση κατανομής της $U(x)$ καθορίζεται από την πιθανότητα των τυχαίων μεταβλητών $U(x_1)$ και $U(x_2)$, ως εξής:

$$F_U(u_1, x_1; u_2, x_2) = P[U(x_1) \leq u_1, U(x_2) \leq u_2] \quad (2.3)$$

Η δύο σημείων συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας θα ισούται με

$$p_u(u_1, x_1; u_2, x_2) = \frac{\partial^2 F_U(u_1, x_1; u_2, x_2)}{\partial u_1 \partial u_2} \quad (2.4)$$

Αντίστοιχα οι n σημείων αθροιστική συνάρτηση κατανομής και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας θα ισούνται με:

$$F_U(u_1, x_1; u_2, x_2, \dots; u_n, x_n) = P[U(x_1) \leq u_1, U(x_2) \leq u_2, \dots, U(x_n) \leq u_n] \quad (2.5)$$

$$p_u(u_1, x_1; u_2, x_2, \dots; u_n, x_n) = \frac{\partial F_U(u_1, x_1; u_2, x_2, \dots; u_n, x_n)}{\partial u_1 \partial u_2 \dots \partial u_n} \quad (2.6)$$

Στην περίπτωση της εξαρτημένης προσομοίωσης, η εξαρτημένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της $U(x_1)$, στη μέτρηση $U(x_2)=u_2$, η οποία πάρθηκε στο σημείο x_2 , θα ισούται με:

$$p_u(u_1, x_1 | u_2, x_2) = p_U[u_1, x_1 | U(x_2) = u_2] = \frac{p_U(u_1, x_1; u_2, x_2)}{p_U(u_2, x_2)} \quad (2.7)$$

με

$$p_u(u_2, x_2) = \int_{-\infty}^{\infty} p_u(u_1, x_1; u_2, x_2) du_1 \quad (2.8)$$

Η εξαρτημένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των $U(x_1)$ και $U(x_2)$, στις μετρήσεις u_3, u_4 , οι οποίες πάρθηκαν στα σημεία x_3 και x_4 , είναι:

$$p_u(u_1, x_1; u_2, x_2 | u_3, x_3; u_4, x_4) = \frac{p_U(u_1, x_1; u_2, x_2; u_3, x_3; u_4, x_4)}{p_U(u_3, x_3; u_4, x_4)} \quad (2.9)$$

με

$$p_u(u_3, x_3; u_4, x_4) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_u(u_1, x_1; u_2, x_2; u_3, x_3; u_4, x_4) du_1 du_2 \quad (2.10)$$

Οι στατιστικές ιδιότητες μια στοχαστικής διαδικασίας (τυχαίο πεδίο) καθορίζονται πλήρως με όλες τις πολυμεταβλητές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας ή αθροιστικές κατανομές αυτής. Στην πραγματικότητα, όμως, είναι αρκετά πολύπλοκο και χρονοβόρο να προκύψουν οι πολυμεταβλητές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας. Ως εκ τούτου, οι ιδιότητες της τυχαίας μεταβλητής $U(x)$ εξετάζονται μέσω κάποιων χαρακτηριστικών των πολυμεταβλητών κατανομών, με τις πιο απλές και ευρέως χρησιμοποιούμενες να είναι οι στατιστικές ροπές. Έτσι, οι διάφορες στατιστικές ροπές για την $U(x)$ καθορίζονται από την πολυμεταβλητή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $p_u(u_1, x_1; u_2, x_2, \dots; u_n, x_n)$, ως εξής:

$$E[U^{m_1}(x_1)U^{m_2}(x_2)\dots U^{m_n}(x_n)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} u_1^{m_1} u_2^{m_2} \dots u_n^{m_n} \cdot p_U(u_1, x_1; u_2, x_2, \dots; u_n, x_n) du_1 du_2 \dots du_n \quad (2.11)$$

Όπου m_i είναι μη αρνητικοί ακέραιοι. Η πρώτη και πιο απλή ροπή είναι ο μέσος ή αναμενόμενη τιμή

$$\langle U(x) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} u p_U(u, x) du \quad (2.12)$$

Η αναμενόμενη τιμή $\langle U(x) \rangle$, ως συνάρτηση της x , περιγράφει την τάση της στοχαστικής διαδικασίας $U(x)$. Η δεύτερη ροπή δίνεται από τη σχέση:

$$\langle U(x_1)U(x_2) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u_1 u_2 p_U(u_1, x_1; u_2, x_2) du_1 du_2 \quad (2.13)$$

και ονομάζεται συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της $U(x)$. Η δεύτερη κεντρική ροπή υπολογίζεται από:

$$\begin{aligned} C_U(x_1, x_2) &= \langle U'(x_1)U'(x_2) \rangle = \langle U(x_1)U(x_2) \rangle - \langle U(x_1) \rangle \langle U(x_2) \rangle \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u_1 u_2 p_U(u_1, x_1; u_2, x_2) du_1 du_2 - \langle U(x_1) \rangle \langle U(x_2) \rangle \end{aligned} \quad (2.14)$$

όπου $U'(x_i) = U(x_i) - \langle U(x_i) \rangle$ είναι η διακύμανση της U στο σημείο x_i . Είναι εμφανές πως η $C_U(x_1, x_2)$ είναι η συμμεταβλητότητα ή συνδιασπορά της τυχαίας μεταβλητής U σε δύο σημεία. Καλείται αυτοσυνδιασπορά της U και συνάρτηση συνδιασποράς/συμμεταβλητότητας αφού είναι συνάρτηση των σημείων.

Τόσο η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης όσο και η συνάρτηση συμμεταβλητότητας είναι συμμετρικές, δηλαδή $\langle U(x_1)U(x_2) \rangle = \langle U(x_2)U(x_1) \rangle$ και $C_U(x_1, x_2) = C_U(x_2, x_1)$. Επιπλέον, και οι δύο συναρτήσεις είναι ημι-θετικά ορισμένες, δηλαδή

$$\sum_{i,j=1}^n a_i a_j \langle U(x_i)U(x_j) \rangle \geq 0, \quad \sum_{i,j=1}^n a_i a_j C_U(x_i, x_j) \geq 0$$

Για κάθε n σημείο x_1, x_2, \dots, x_n και για κάθε n πραγματικό συντελεστή a_1, a_2, \dots, a_n . Όταν $x_1 = x_2 = \dots = x_n$, τότε συνάρτηση συμμεταβλητότητας μειώνεται στην συνάρτηση διασποράς

$$\sigma_U^2(x) = C_U(x, x) = \int_{-\infty}^{\infty} u^2 p_U(u, x) du - \langle U(x_1) \rangle^2 \quad (2.15)$$

Ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης, ο οποίος είναι και αυτός συμμετρικός και ημι-θετικά ορισμένος, ισούται με:

$$\rho_U(x_1, x_2) = \frac{C_U(x_1, x_2)}{\sigma_U(x_1)\sigma_U(x_2)} \quad (2.16)$$

Προηγουμένως ειπώθηκε πως αυτοσυνδιασπορά είναι συνήθως συνάρτηση των σημείων. Υπάρχουν όμως εξαιρέσεις, με την πρώτη να είναι η λεγόμενη διαδικασία του λευκού ήχου, όπου οι τιμές $U(x_i)$ και $U(x_j)$ είναι ασυσχέτιστες για κάθε $x_i \neq x_j$. Η αυτοσυνδιασπορά μιας διαδικασίας λευκού ήχου ισούται με:

$$C_U(x_i, x_j) = S_0(x_i)\delta(x_i - x_j) \quad (2.17)$$

όπου S_0 είναι μια φασματική συχνότητα. Δε θα αναλυθεί περαιτέρω μιας και δεν αφορά τη συγκεκριμένη έρευνα. Η δεύτερη εξαίρεση, η οποία συναντάται στην εν λόγω έρευνα είναι αυτή της στασιμότητας και θα αναπτυχθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Μία στοχαστική διαδικασία (ή μια τυχαία μεταβλητή) καλείται κανονική αν οι μεταβλητές $U(x_1), U(x_2), \dots, U(x_n)$ είναι από κοινού κανονικές για κάθε σεν n σημείων. Μια κανονική (Gaussian) διαδικασία χαρακτηρίζεται αποκλειστικά από το μέσο της

$\langle U(x) \rangle = \mu_U(x)$ και την αυτοσυνδιασποράς της $C_U(x_i, x_j)$. Η πολυμεταβλητή χαρακτηριστική συνάρτηση της κανονικής στοχαστικής διαδικασίας είναι:

$$\Phi_U(k_1, x_1; k_2, x_2, \dots; k_n, x_n) = \exp \left[i \sum_{i=1}^n k_i \mu(x_i) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_U(x_i, x_j) k_i k_j \right] \quad (2.18)$$

Μία ντετερμινιστική συνάρτηση $V(x)=g[U(x)]$ μια στοχαστικής διαδικασίας $U(x)$ αποτελεί και αυτή στοχαστική διαδικασία. Τα στατιστικά της νέας στοχαστικής διαδικασίας $V(x)$ μπορούν να προκύψουν από το μετασχηματισμό των αντίστοιχων της $U(x)$ και αντίστροφα. Για παράδειγμα η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της $V(x)$ μπορεί να προκύψει από την αντίστοιχη της $U(x)$ εξισώνοντας τις αθροιστικές κατανομές τους $FV[g(u)] = FU(u)$ και παραγωγίζοντας τες, οπότε:

$$p_V(u) = p_U(u) \left| \frac{du}{dv} \right| = p_U(u) \left| \frac{dg^{-1}(u)}{dv} \right| \quad (2.19)$$

όπου $u = g^{-1}(v)$ είναι ο αντίστροφος μετασχηματισμός. Είναι προφανές πως αν η $U(x)$ είναι κανονική, τότε η $V(x)=\exp(U)$ είναι μια λογοκανονική στοχαστική διαδικασία και το αντίστροφο. Οι μέσοι, οι διακυμάνσεις και οι αυτοσυνδιασπορές των δύο μεταβλητών συνδέονται ως εξής:

$$\langle V_i \rangle = \exp \left[\langle U_i \rangle + \frac{1}{2} \sigma_{U_i}^2 \right] \quad (2.20)$$

$$\sigma_{U_i}^2 = \ln \left[1 + \frac{\sigma_{V_i}^2}{\langle V_i \rangle^2} \right] \quad (2.21)$$

$$Cov(U_1, U_2) = \ln \left[1 + \frac{Cov(V_1, V_2)}{\langle V_1 \rangle \langle V_2 \rangle} \right] \quad (2.22)$$

Η αναφορά στην κανονική και λογοκανονική στοχαστική διαδικασία δεν είναι τυχαία μιας και έτσι θα αντιμετωπιστεί παρακάτω η στοχαστική προσέγγιση της υδραυλικής αγωγιμότητας.

2.3.2. Κύριες μέθοδοι στοχαστικής προσομοίωσης

Τρεις κύριες μέθοδοι έχουν ευρέως χρησιμοποιηθεί, οι οποίες είναι:

Πρώτου βαθμού ανάλυση (First Order Analysis): Αποτελεί ένα απλό και άμεσο μέσο για την εξέταση της αβεβαιότητας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε με αναλυτικές, είτε με αριθμητικές λύσεις στις εξισώσεις κίνησης υπόγειας ροής, μιας και αυτή αρχικά εξαντλείται/γραμμικοποιείται μέσω δυναμοσειρών, αλλά περιορίζεται σε γραμμικά ή σχεδόν γραμμικά συστήματα, στα οποία ο συντελεστής διακύμανσης των παραμέτρων είναι μικρότερος από τη μονάδα (Peck et al., 1988). Επομένως, δεν καθίσταται κατάλληλη για περίπλοκες οριακές συνθήκες και για μη μόνιμες συνθήκες Απαιτούνται μόνο ο μέσος και η διασπορά των παραμέτρων και παρέχει τις αντίστοιχες στατιστικές

ροπές για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Πρόδρομες εργασίες που έκαναν χρήση της ανάλυσης αυτής σε προβλήματα υπόγειας ροής είναι των Dettinger και Wilson (1981), Townley και Wilson (1985) και Sitar et. al. (1987). Η δομή των αλγορίθμων είναι τέτοια, ώστε να γίνεται χρήση ενός μητρώου συντελεστών όμοιο με αυτό της ανάλυσης ευαισθησίας. Η μέθοδος δε συνίσταται για την εκτίμηση των πιθανοτήτων αστοχίας εκτός και αν γίνουν κάποιες υποθέσεις για τη μορφή των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας των αποτελεσμάτων.

Ανάλυση διαταραχής: Η εν λόγω ανάλυση έχει πλήρως αναπτυχθεί για εφαρμογές σε προβλήματα υπόγειας ροής από τον Gelhar και τους συνεργάτες του (Bakr et al., 1978; Gutjahr et al., 1978; Gutjahr και Gelhar, 1981; Gelhar, 1984; Gelhar, 1986). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο τόσο οι παράμετροι όσο και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθορίζονται σε σχέση με το μέσο τους όρο συν μια διαταραχή γύρω από αυτόν. Η σχέση ανάμεσα στα δεδομένα και στα αποτελέσματα μπορεί να καθοριστεί με βάση δύο τεχνικές. Στην πρώτη, οι σχέσεις αναπτύσσονται σε ένα φασματικό πεδίο κάνοντας χρήση των ολοκληρωμάτων Fourier-Stieltjes και ενός αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier. Τα μαθηματικά είναι δύσκολα, αλλά αξιόπιστα. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για επίλυση μέσω αναλυτικών λύσεων, για απεριόριστο πεδίο ροής και μικρό συντελεστή διασποράς των δεδομένων. Στη δεύτερη τεχνική, οι εξισώσεις διαταραχής επιλύονται με αναλυτικές μεθόδους, όπως πεπερασμένες διαφορές ή πεπερασμένα στοιχεία (Tang και Pinder, 1977; Sagar, 1978; Graham και McLaughlin, 1989).

Monte Carlo: Αντίγραφα της δομής του υδροφορέα παράγονται και το πεδίο των ροών επιλύεται επαναληπτικά για καθένα από αυτά, ώστε να προκύψουν οι εξαρτημένες μεταβλητές, δηλαδή αντίστοιχα πεδία υδραυλικών υψών. Επειδή, στην εν λόγω έρευνα χρησιμοποιείται η μέθοδος αυτή, θα αναπτυχθεί λεπτομερώς παρακάτω.

2.3.3. Η μέθοδος Monte Carlo

Η αρχή πίσω από τη μέθοδο Monte Carlo είναι η στατιστική δειγματοληψία, η οποία χρονολογείται πίσω στα τέλη του 18ου αιώνα. Όμως, εξαιτίας του φόρτου εργασίας και του χρόνου που απαιτείται για τους υπολογισμούς δεν είχε απήχηση σε καμιά επιστήμη μέχρι την είσοδο των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η ανάπτυξη μιας μεθόδου μηχανογραφημένης στατιστικής δειγματοληψίας πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά στο Los Alamos Laboratory το 1964, από τον επιστήμονα Stanislaw Ulam και τον σύμβουλο John von Neuman (Eckhardt et al., 1987). Το όνομα της μεθόδου δόθηκε από έναν άλλο επιστήμονα του ίδιου εργαστηρίου, τον Nichola C. Metropolis (Metropolis, 1987). Το πρόβλημα που οδήγησε τους επιστήμονες του Los Alamos στην ανάπτυξη της μεθόδου ήταν η διάχυση των νετρονίων και ο πολλαπλασιασμός τους. Από τότε, η μέθοδος έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε ένα μεγάλο φάσμα επιστημονικών προβλημάτων διαφόρων επιστημονικών πεδίων.

Οι πρώτες εφαρμογές της μεθόδου Monte Carlo στη ροή σε πορώδη μέσα πραγματοποιήθηκαν από τους Warren and Price (1961) και Shvidler (1964). Οι Warren and Price (1961) παρουσίασαν ένα εκτενές σύνολο προσομοιώσεων Monte Carlo

μελετώντας τη ροή μέσω ετερογενών πορώδων μέσων και εξετάζοντας την επίδραση των κατανομών πιθανότητας της υδραυλικής αγωγιμότητας στα αποτελέσματα της ροής σε μία και σε τρεις διαστάσεις. Έκτοτε, η μέθοδος ξέφευγε από την προσοχή των ερευνητών πάνω σε θέματα ροής σε πορώδη μέσα, μέχρι την εργασία του Freeze (1975). Ο Freeze χρησιμοποίησε τη μέθοδο για να μελετήσει τη χρονικά μεταβαλλόμενη και μη ροή σε ένα μονοδιάστατο οριοθετημένο πλαίσιο, στο οποίο η υδραυλική αγωγιμότητα ήταν στατιστικά ανεξάρτητη σε γειτονικά μπλοκ. Από τις μεγάλες διακυμάνσεις των υδραυλικών υψών, οι οποίες προέκυπταν από τις προσομοιώσεις του, ο Freeze άρχισε να αμφισβητεί τη χρησιμότητα της ντετερμινιστικής προσομοίωσης στην υπόγεια υδρολογία. Παρόλο που τα αποτελέσματά του στηρίζονταν σε απλοποιημένες υποθέσεις, η εργασία του Freeze είναι αναμφίβολα η απαρχή της στοχαστικής προσομοίωσης για τη ροή σε πορώδη μέσα.

Η αριθμητική στοχαστική προσομοίωση πραγματοποιείται από τη δημιουργία ενός τυχαίου πεδίου μιας τυχαίας μεταβλητής $Z(x)$ σε ξεχωριστές θέσεις χρησιμοποιώντας μια μήτρα παραγωγής τυχαίων αριθμών. Αυτή η μήτρα πρέπει να υπακούει στη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, στη διασπορά και στη δομή της χωρικής συσχέτισης της μεταβλητής. Για παράδειγμα, ένα πεδίο της υδραυλικής αγωγιμότητας $K(x)$ μπορεί να παραχθεί γνωρίζοντας τη λογοκανονική της κατανομή, τη μέση τιμή και τη συνάρτηση συμμεταβλητότητας. Δεν απαιτούνται περαιτέρω περιορισμοί, όπως μικρές τιμές διασποράς. Η διαδικασία παραγωγής των πολλαπλών απεικονίσεων δύναται να υπακούει/εξαρτάται από τις δειγματοληπτικές τιμές της μεταβλητής $Z(x)$ στο χώρο και άρα μιλάμε για εξαρτημένη στοχαστική προσομοίωση, ενώ όταν δε συμβαίνει αυτό μιλάμε για μη εξαρτημένη στοχαστική προσομοίωση. Ο αριθμός των τυχαίων μεταβλητών μπορεί να είναι αυθαίρετος, μιας και δεν υπάρχει περιορισμός. Για παράδειγμα μπορεί παράλληλα να παραχθούν πεδία τόσο για την υδραυλική αγωγιμότητα όσο και για το πορώδες ή οποιαδήποτε άλλη παράμετρος που θεωρείται επίσης αβέβαιη και απαιτείται να προσεγγισθεί στοχαστικά. Με τη χρήση της μεθόδου Monte Carlo, η στοχαστική προσομοίωση παράγει πολλαπλές ισοπίθανες, ανεξάρτητες απεικονίσεις/πραγματώσεις των τυχαίων πεδίων. Γνωρίζοντας τις παραμέτρους π.χ. για μία από τις παραπάνω απεικονίσεις, το πεδίο τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας μπορεί να βρεθεί για την εν λόγω απεικόνιση με τη χρήση ενός ντετερμινιστικού μαθηματικού μοντέλου της υπόγειας ροής, με δεδομένα όμως και ντετερμινιστικά όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του υδροφορέα που έχουν εισαχθεί στο μοντέλο, όπως π.χ. αρχικές και οριακές συνθήκες, εισροές και εκροές κ.α.. Το αποτέλεσμα αυτής της προσομοίωσης είναι εξαρτημένες μεταβλητές όπως υδραυλικά ύψη $h(x)$, ροές $Q(x)$ κ.α. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά της εξαρτημένης μεταβλητής (μέσος και διασπορά) σε οποιαδήποτε θέση x χαρακτηρίζουν την αβεβαιότητα. Ένα σύνηθες παράδειγμα στοχαστικής προσομοίωσης με τη χρήση της μεθόδου Monte Carlo είναι η παραγωγή πολλαπλών, ισοπίθανων πεδίων της υδραυλικής αγωγιμότητας K για έναν υπόγειο υδροφορέα. Για κάθε ένα από τα πεδία τιμών του K , επιλύεται μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου υπόγειας ροής, η βασική εξίσωση της κίνησης του υπόγειου νερού και προκύπτουν αντίστοιχα υδραυλικά ύψη $h(x)$. Ακολουθεί έπειτα στατιστική ανάλυση

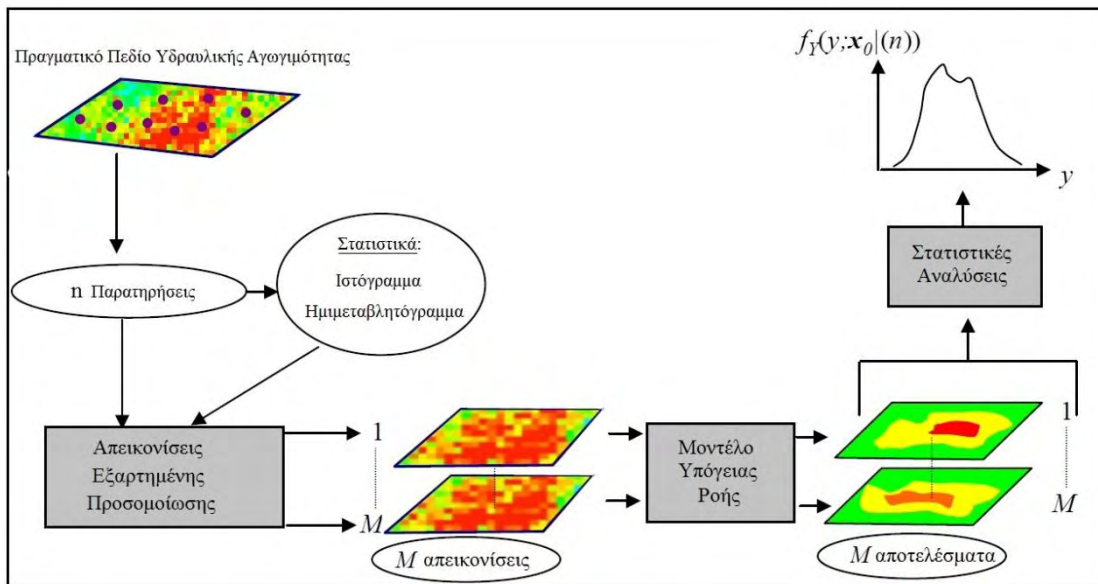
των πολλαπλών παραγόμενων πεδίων των υδραυλικών υψών για να εκτιμηθεί η αβεβαιότητα που προκαλεί η χωρική κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας. Επιγραμματικά, η προσομοίωση Monte Carlo μπορεί να χαρακτηριστεί από:

- Διαφορετικές παράμετροι μπορούν να προσομοιωθούν παράλληλα.
- Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας πρέπει να δίνεται ή να υποτεθεί.
- Καθορίζεται για κάθε παράμετρο μια τυχαία τιμή σύμφωνα με τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας.
- Οι τιμές της παραμέτρου μπορεί να είναι συσχετιζόμενες με βάση τις συναρτήσεις διακύμανσης ή όχι.
- Η παραγωγική διαδικασία των πεδίων των παραμέτρων μπορεί να εξαρτάται από τις δειγματοληπτικές τιμές των παραμέτρων αυτών σε συγκεκριμένες θέσεις.
- Για κάθε παραγόμενο πεδίο παραμέτρων η εξίσωση της κίνησης του υπόγειου νερού λύνεται αριθμητικά.
- Από τη λύση προκύπτει το πεδίο τιμών των υδραυλικών υψών $h(x)$.
- Η προσομοίωση πραγματοποιείται για κάθε παραγόμενο πεδίο της παραμέτρου.
- Τα αποτελέσματα αναλύονται/εξετάζονται στατιστικά ώστε να χαρακτηρίσουν το βαθμό αβεβαιότητας.

Η διαδικασία της μπορεί να συνοψιστεί από τα παρακάτω γενικά βήματα:

- Εκτίμηση των παραμέτρων του ντετερμινιστικού μοντέλου μέσω του αντίστροφου προβλήματος
- Υπολογισμός του γραμμικού μοντέλου του μητρώου συμεταβλητότητας των παραμέτρων
- Χρήση αυτού του μητρώου για την παραγωγή ενός μεγάλου αριθμού απεικονίσεων
- Υπολογισμός των εξαρτημένων τιμών (π.χ. υδραυλικά ύψη) από το μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης για κάθε απεικόνιση
- Στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων για την εκτίμηση της αβεβαιότητας.

Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται γραφικά η διαδικασία της Monte Carlo, όσον αφορά την προσομοίωση της υδραυλικής αγωγιμότητας.



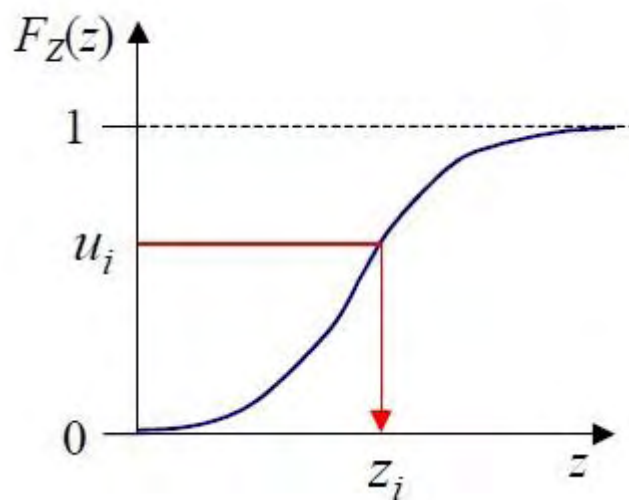
Σχήμα 2. 3. Σχηματική αναπαράσταση της προσομοίωσης Monte Carlo για την υδραυλική αγωγιμότητα στην προσομοίωση της υπόγειας ροής από τους (Bierkens και Van Geer, 2008).

Η μεθοδολογία για τη δειγματοληψία τυχαίων αριθμών της Monte Carlo είναι:

1. Παραγωγή μιας απεικόνισης z_i , της μεταβλητής Z χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της $f_z(z)$. Αυτό επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό της συνάρτησης κατανομής από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$F_z(z) = \Pr[Z \leq z] = \int_{-\infty}^z f_z(z') dz' \quad (2.23)$$

και επιλέγοντας μια ομοιόμορφη απόκλιση* u_i μεταξύ 0 και 1 χρησιμοποιώντας μία μήτρα παραγωγής τυχαίων ψευδοαριθμών (Press et al., 1986). Στη συνέχεια μετατρέπεται η u_i με τη χρήση της αντίστροφης συνάρτησης $z_i = F_z^{-1}(u_i)$



Σχήμα 2. 4. Παραγωγή ενός τυχαίου αριθμού από μια δοσμένη συνάρτηση κατανομής.

* Ο όρος ομοιόμορφη απόκλιση (uniform deviate) είναι απλά ένας τυχαίος αριθμός, ο οποίος κυμαίνεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών (τυπικά 0 ως 1) και ο οποίος έχει την ίδια πιθανότητα εμφάνισης με οποιοδήποτε άλλον. Διαφέρουν από τους τυχαίους αριθμούς στο ότι ο εν λόγω αριθμός αντιστοιχεί σε μια τιμή της μεταβλητής στον πραγματικό χώρο.

2. Υπολογισμός της απεικόνισης y_i της Y εισάγοντας την z_i . $Y_i = g(z_i)$.
3. Επανάληψη των βημάτων 1 και 2 για μεγάλο αριθμό επαναλήψεων
4. Από τις M προσομοιωμένες απεικονίσεις y_i , $i=1, \dots, M$ μπορεί να εκτιμηθεί η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ή η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της Y .

Παρόλο που η μέθοδος Monte Carlo αποτελεί την αξιόπιστη προσέγγιση της αβεβαιότητας και αυτό επιβεβαιώνεται από την ευρεία χρήση της, δεσμεύεται από κάποιους περιορισμούς, οι οποίοι πρέπει να τηρηθούν, ώστε να επιτευχθεί αυτή η αξιοπιστία. Οι περιορισμοί αυτοί είναι:

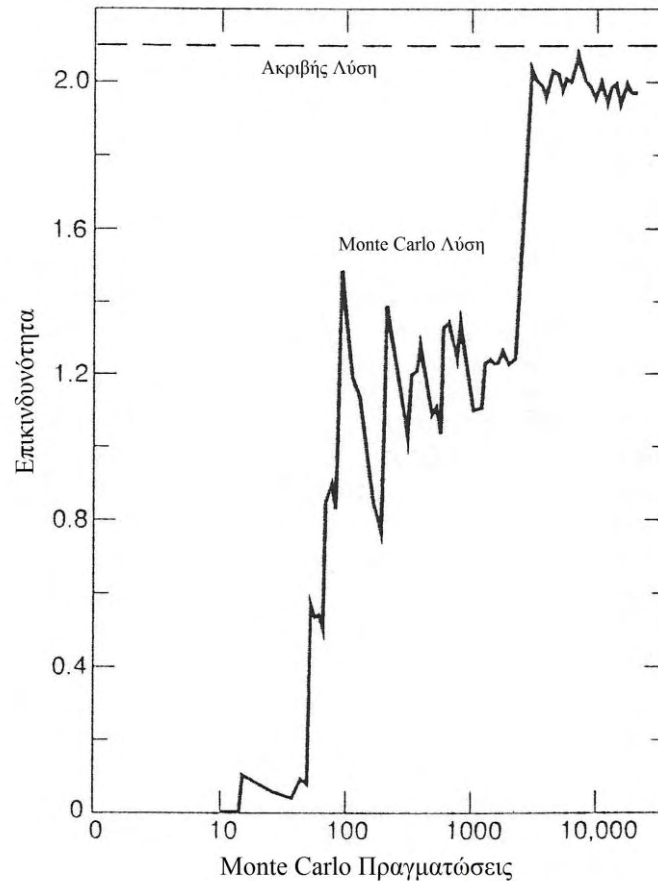
1. Μέγεθος πραγματώσεων/απεικονίσεων: Παράγοντας έναν μικρό αριθμό πραγματώσεων ($N < 100$), είναι πιθανό να προκύψει μια αξιόπιστη εκτίμηση των αποτελεσμάτων μόνο για τον μέσο όρο αυτών. Ιδιαίτερα στην περίπτωση που το πρόβλημα εμπεριέχει πολλές μη γραμμικότητες, η ανάγκη αυτού του περιορισμού γίνεται ακόμη πιο επιτακτική. Για την εκτίμηση και των άλλων στατιστικών ροπών, απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός παραγόμενων πραγματώσεων ($N \geq 100$). Αυτός ο αριθμός εξαρτάται από τη μεταβλητότητα των παραμέτρων και τον αριθμό των δειγματοληπτικών τιμών τους. Για να επιτευχθεί υψηλό ποσοστό σύγκλισης των στοχαστικών αποτελεσμάτων με την ακριβή λύση απαιτείται και μεγάλος αριθμός πραγματώσεων. Η σχέση μάλιστα του ποσοστού αυτού με τον αριθμό πραγματώσεων είναι αντίστροφη. Όσο πιο μικρός είναι ο αριθμός των πραγματώσεων τόσο πιο πολύ δεν αποτυπώνουν τα παραγόμενα στοχαστικά αποτελέσματα την πραγματική αβεβαιότητα του συστήματος. Μάλιστα, για αυτόν τον λόγο οι Ang και Tang (1984) πρότειναν τη χρήση της παρακάτω μαθηματικής έκφρασης για το λάθος της εκτίμησης:

$$\% \text{ σφάλμα} = 200 [(1-f)/nf]^2 \quad (2.24)$$

όπου f είναι η εκτιμώμενη πιθανότητα μη ικανοποιητικής απόδοσης και n ο αριθμός των πραγματώσεων. Έδωσαν μάλιστα ένα ποσοστό 5% να μην ικανοποιείται αυτή η έκφραση. Έτσι για παράδειγμα, αν κάποιος θέλει η πιθανότητα αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του να είναι $f=0.05$ (δηλαδή οι 5 από τις 100 απεικονίσεις να μην ικανοποιούν κάποιους περιορισμούς π.χ. μη σύγκλισης των παραγόμενων υδραυλικών υψών με τα παρατηρούμενα), τότε υπάρχει περίπτωση κατά 95%, το σφάλμα να είναι 7.22%. Αυτό ισχύει στην περίπτωση της μη εξαρτημένης προσομοίωσης, στην οποία δεν υπάρχουν δειγματοληπτικές τιμές της παραμέτρου, αλλά ούτε και ύπαρξη της χωρικής συσχέτισης τους.

Για να αντιμετωπιστεί αυτό το εμπόδιο των πολλών πραγματώσεων, οι Robinson και Hodgkinson (1986), παρουσίασαν μια ημι-αναλυτική μέθοδο για να εκτιμήσουν ακριβώς τη πιθανότητα σύγκλισης τέτοιων καταστάσεων. Η μέθοδος τους στηρίχθηκε στη σύγκριση και σύγκλιση των στοχαστικών αποτελεσμάτων με μια ακριβή λύση. Στο Σχήμα 2.5 φαίνεται πως η σύγκλιση

της Monte Carlo είναι ακανόνιστη με απότομες αυξομειώσεις ανάμεσα στον αριθμό των πραγματώσεων. Το γεγονός αυτό το στήριξαν στην παρουσία ισχυρών σχέσεων μη γραμμικότητας ανάμεσα στις παραμέτρους που αντιμετωπίζονται στοχαστικά και στα παραγόμενα αποτελέσματα.



Σχήμα 2. 5. Επίδραση του αριθμού των πραγματώσεων Monte Carlo στην εκτίμηση της επικινδυνότητας από τους Robinson και Hodgkinson (1986).

Ο περιορισμός όμως του αριθμού των πραγματώσεων αντιμετωπίζεται με την εξαρτημένη προσομοίωση, η οποία οδηγεί σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Εφόσον μάλιστα διατίθενται οι δειγματοληπτικές τιμές της παραμέτρου, με τη χρήση μεθόδων χωρικής παρεμβολής (π.χ. Kriging), μπορεί να προκύψει η χωρική συσχέτιση των τιμών της παραμέτρου, γεγονός που οδηγεί σε ακόμη πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, χωρίς την ανάγκη μεγάλου αριθμού πραγματώσεων. Τέλος, η σύγκριση των παραγόμενων αποτελεσμάτων των πραγματώσεων με παρατηρούμενα είναι ένας άλλος τρόπος για τη μείωση του αριθμού των πραγματώσεων.

2. Τήρηση της παραδοχής της στασιμότητας: Για τη χρήση της μεθόδου Monte Carlo, έγινε η παραδοχή της στασιμότητας. Έτσι η μεταβλητότητα ή αβεβαιότητα των παραμέτρων μπορεί να περιγραφεί από στάσιμες τυχαίες συναρτήσεις, από τις οποίες κάποιος μπορεί να εκτιμήσει το μέσο, τη διασπορά και τη συνδιασπορά. Στην περίπτωση που η παράμετρος είναι η υδραυλική

αγωγιμότητα, η παραδοχή του λογοκανονικού πεδίου τιμών της αποτελεί μονόδρομο. Έχει εφαρμοστεί σε πλήθος περιπτώσεων και έχει δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα.

3. Κατά μέσο όρο κλίμακα: Έχει αναφερθεί και προηγουμένως πως ο ερευνητής/μελετητής πρέπει να γνωρίζει ότι οι δειγματοληπτικές τιμές των παραμέτρων, που αντιμετωπίζονται στοχαστικά είναι οι μέσες τιμές αυτών της τοπικής κλίμακας. Αυτό άλλωστε, από μόνο του αποτελεί και πηγή αβεβαιότητας. Ως επακόλουθο είναι να επηρεάζει την εκτίμηση του μεταβλητογράμματος μιας και υπό συνθήκες στασιμότητας εξαρτάται μόνο από την απόσταση των σημείων. Η αντιμετώπιση του περιορισμού αυτού, αποτελεί, σε πραγματικά προβλήματα υδροφορέων, δύσκολο εγχείρημα μιας και επιτυγχάνεται μέσω αναλυτικών λύσεων. Στην περίπτωση που αυτό δεν γίνεται μπορεί ο ερευνητής/μελετητής να καταφύγει στην αριθμητική ολοκλήρωση των τιμών τοπικής κλίμακας.

2.3.4. Συμβολή της στοχαστικής προσομοίωσης της υδραυλικής αγωγιμότητας σε προβλήματα υπόγειας ροής.

Η εμφάνιση της στοχαστικής προσομοίωσης στην υπόγεια υδρολογία χρεώνεται στον Freeze (1975), αν και πρότερες θεωρητικές αναφορές έχουν γίνει από τους Shvidler (1962) και Matheron (1967). Από τότε και έπειτα, το πεδίο αυτό γνώρισε εξαιρετική άνθιση με τις δημοσιεύσεις εργασιών σε επιστημονικά περιοδικά να διαδέχονται η μία την άλλη και το συνολικό τους αριθμό να φτάνει τις 2800 μέχρι το 2006 (Renard, 2006). Η μεγάλη άνθισή της οφείλεται στην περιβαλλοντική έγνοια τόσο των πολιτών όσο και των κυβερνήσεων. Ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του '90 η Ευρωπαϊκή Ένωση στηρίζει σημαντικά την έρευνα για την προστασία του περιβάλλοντος. Από την άλλη μεριά, στην Αμερική, τα πράγματα ήταν διαφορετικά. Η έλλειψη μέριμνας για την προστασία του περιβάλλοντος από πολίτες και κυβερνήσεις οδήγησε σε πληθώρα ατυχημάτων με αρνητικές συνέπειες στο πόσιμο νερό. Οι επιστήμονες που επιστρατεύονταν για τη λήψη μέτρων τόσο για την αντιστροφή της κατάστασης όσο και για την πρόληψη αυτών, μπόρεσαν μέσω της χρηματοδότησης από την κυβέρνηση των ΗΠΑ να αναδείξουν και να εξελίξουν αυτό το πεδίο. Ένας δεύτερος εξίσου σημαντικός παράγοντας και είναι η ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, η οποία επέφερε και τη δημιουργία των μοντέλων/προγραμμάτων προσομοίωσης. Οι μέθοδοι αυτές είναι χρονοβόρες ακόμη και σήμερα, παρόλο την υπάρχουσα σημαντική υπολογιστική ισχύ, γεγονός που τις καθιστούσε μη εφαρμόσιμες τα πρώτα χρόνια. Ο τρίτος παράγοντας έχει να κάνει καθαρά με το γεγονός ότι αποτέλεσε και αποτελεί μέχρι και σήμερα μια καινοτόμο/πρωτοποριακή επιστημονική μέθοδο σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους (μαθηματικά, φυσική, γεωλογία, μηχανική, οικονομική κ.α.) με την επιστημονική κοινότητα να δείχνει μεγάλο ενδιαφέρον.

Πλέον, αν ανατρέξει κάποιος στη βιβλιογραφία θα βρει έναν πολύ σημαντικό αριθμό δημοσιευμένων εργασιών της υπόγειας υδρολογίας πάνω στη στοχαστική προσομοίωση

της υδραυλικής αγωγιμότητας. Παρακάτω θα γίνει βιβλιογραφική αναφορά μόνο στις αρχικές ερευνητικές εργασίες που έβαλαν τα θεμέλιά της.

Το πρώτο στοχαστικό μοντέλο ροής σε πορώδη μέσα αναπτύχθηκε από τους Warren και Price (1961). Ο στόχος τους ήταν να μελετήσουν την επίδραση των ετερογενειών. Δύο συστήματα ροής εξετάστηκαν. Το ένα ήταν μόνιμης και τρισδιάστατης ροής προκαλούμενη από τη διαφορά υδραυλικού ύψους ανάμεσα σε δύο έδρες ενός κύβου. Το άλλο ήταν μη μόνιμης και τρισδιάστατης ροής γύρω από πηγάδι άντλησης. Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας υποτίθεται πως προερχόντουσαν από μια γνωστή κατανομή με μικρή διακύμανση και στατιστικά ανεξάρτητη. Οι κατανομές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν λογοκανονικές, εκθετικές, λοξές λογοκανονικές γραμμικές και μη συνεχείς. Ένα από τα βασικά αποτελέσματα ήταν πως η ετερογενής συμπεριφορά του υδροφορέα μπορεί να προσεγγισθεί με μια ομοιογενής όταν η κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι λογοκανονική, με την προϋπόθεση ότι η ομογενής τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας θα είναι ο γεωμετρικός μέσος της κατανομής.

Ο Bouwer (1969), μέσω αναλογικών προσομοιώσεων, εργάστηκε παρόμοια με τους Warren και Price (1961) για ένα δυσδιάστατο πεδίο ροής. Προσομοιώθηκε ροή ανάμεσα σε δύο πλευρές ενός τετραγώνου για τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, οι οποίες τυχαία επιλέχθηκαν από δύο είδη κατανομών. Αυτές ήταν, μια ομοιόμορφη στο διάστημα 1 έως 10 και μια δυαδική με τιμές από το ίδιο διάστημα. Και στις δύο περιπτώσεις ο Bower κατέληξε ότι ένας μέτρια ετερογενής υδροφορέας μπορεί να αντικατασταθεί από έναν ομοιογενή με τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας ίσης με το γεωμετρικό μέσο της κατανομής.

Οι Gilham και Farvoldenn (1974) μελέτησαν πως οι διακυμάνσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας επηρεάζουν τις τιμές των παραγόμενων υδραυλικών υψών και το πεδίο ροής. Με τη χρήση της ανάλυσης της ευαισθησίας μελετήθηκε μια μη μόνιμη και κορεσμένη ροή σε ανομοιογενείς και ανισότροπες τομές ενός υδροφορέα, ο οποίος είχε καθορισμένη στάθμη. Βρήκαν τις περιοχές στις οποίες οι αλλαγές της υδραυλικής αγωγιμότητας είχαν τη μεγαλύτερη επίδραση στην κατανομή των υδραυλικών υψών. Κατέληξαν στο γεγονός ότι με το να αλλάζει κάποιος πολλές τοπικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας για να ρυθμίσει το μοντέλο του, καταλήγει σε μη αξιόπιστα αποτελέσματα.

Οι Gates και Kisiel (1974) παρουσίασαν μια μεθοδολογία για να μελετήσουν την επίδραση των σφαλμάτων σε βασικά δεδομένα στα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης και για να εκτιμήσουν την αξία της επιπλέον πληροφορίας. Τα σφάλματα των βασικών δεδομένων καθορίστηκαν ως η διαφορά ανάμεσα στις προσομοιωμένες και τις παρατηρούμενες τιμές των μεταβλητών των μοντέλων. Το μέγεθος της αβεβαιότητας στα αποτελέσματα του μοντέλου μετρήθηκε από το αναμενόμενο σφάλμα στα προσομοιωμένα υδραυλικά ύψη σε σχέση με κάποια σφάλματα των μεταβλητών του μοντέλου. Υποθετικές μετρήσεις και η μείωση που αυτές προκαλούν στην αβεβαιότητα χρησιμοποιήθηκαν για να ληφθούν επιπλέον μετρήσεις. Η διαδικασία αυτή απαιτεί γνώση της πρότερης κατανομής των μεταβλητών και κάνει εκτενή χρήση της θεωρίας απόφασης. Χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο

διαφορικών εξισώσεων. Η διαπερατότητα, ο συντελεστής αποθήκευσης, η εκροή, η κατείσδυση και οι αρχικές συνθήκες ήταν οι υπό εξέταση μεταβλητές. Εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων, υποτέθηκε η πρότερη κατανομή των μεταβλητών. Η διαστατότητα και η έλλειψη δεδομένων αποδείχθηκαν τα δύο βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου.

Η πρωτοπόρος μελέτη της στοχαστικής προσομοίωσης πάνω στην ετερογένεια των παραμέτρων ενός μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής ήταν αυτή του Freeze (1975). Στην εργασία του αναλύθηκε η μονοδιάστατη υπόγεια ροή σε μη ενιαίο και ομογενές μέσο. Ο Freeze έκανε μια αναλυτική μελέτη των προβλημάτων της μονοδιάστατης και κορεσμένης ροής, όπου η μεταβλητότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας (K), του πορώδους (ε), και της αποθηκευτικότητας (S) λήφθηκαν υπόψη. Χρησιμοποιήθηκε μία από κοινού κατανομή πιθανότητας των τριών αυτών παραμέτρων για την παραγωγή των προσομοιώσεων Monte Carlo. Το βασικό μειονέκτημα ήταν η έλλειψη της χωρικής συσχέτισης. Οι τιμές των παραμέτρων για κάθε μπλοκ ήταν ανεξάρτητες από αυτές των άλλων μπλοκ. Δύο ασκήσεις προσομοίωσης έλαβαν χώρα: μόνιμη ροή ανάμεσα σε δύο σημεία με διαφορά υδραυλικού ύψους και μη μόνιμη ροή σε μια διαδικασία ενοποίησης. Τα τέσσερα πιο σημαντικά αποτελέσματα ήταν: 1) παρόλο που οι παράμετροι $\log K$, ε και S θεωρήθηκε πως ήταν κανονικά κατανεμημένες, τα παραγόμενα υδραυλικά ύψη δεν ήταν, εκτός από την περίπτωση της μη μόνιμης ροής και μικρών τιμών διακύμανσης της $\log K$, 2) η διακύμανση των παραγόμενων υδραυλικών υψών εξαρτάται σημαντικά από τη διακύμανση τόσο της $\log K$ όσο και του πορώδους (ε), 3) σε αντίθεση με τη μόνιμη ροή στην οποία η ενεργός υδραυλική αγωγιμότητα ήταν ίση με τον αρμονικό μέσο των μεμονωμένων τιμών, στη μη μόνιμη η ενεργός υδραυλική αγωγιμότητα ήταν εξαρτώμενη του χρόνου και 4) η διακύμανση των υδραυλικών υψών εξαρτάται από τη χωρική διακριτοποίηση του μοντέλου. Αυτά τα αποτελέσματα οδήγησαν τον Freeze να κλείσει την εργασία του με μια πεσιμιστική άποψη για τη χρησιμότητα της ντετερμινιστικής προσομοίωσης.

Οi Gelhar et al. (1977) έκαναν κάποια σχόλια στην εργασία του Freeze (1975) και σημείωσαν ότι η έλλειψη της συσχέτισης ήταν ο λόγος της εξάρτησης της διακύμανσης των υδραυλικών υψών από τη χωρική διακριτοποίηση του μοντέλου. Τόνισαν επίσης ότι η συγκεκριμένη διαδρομή που ακολουθεί το νερό ανάμεσα σε δύο σημεία μιας μονοδιάστατης ροής είναι αυτή που προκαλεί και τις σημαντικές διακυμάνσεις στα υδραυλικά ύψη. Κάτι το οποίο δε συμβαίνει σε προβλήματα δισδιάστατης ή τρισδιάστατης ροής διότι το νερό ακολουθεί εναλλακτικές διαδρομές με μικρότερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας.

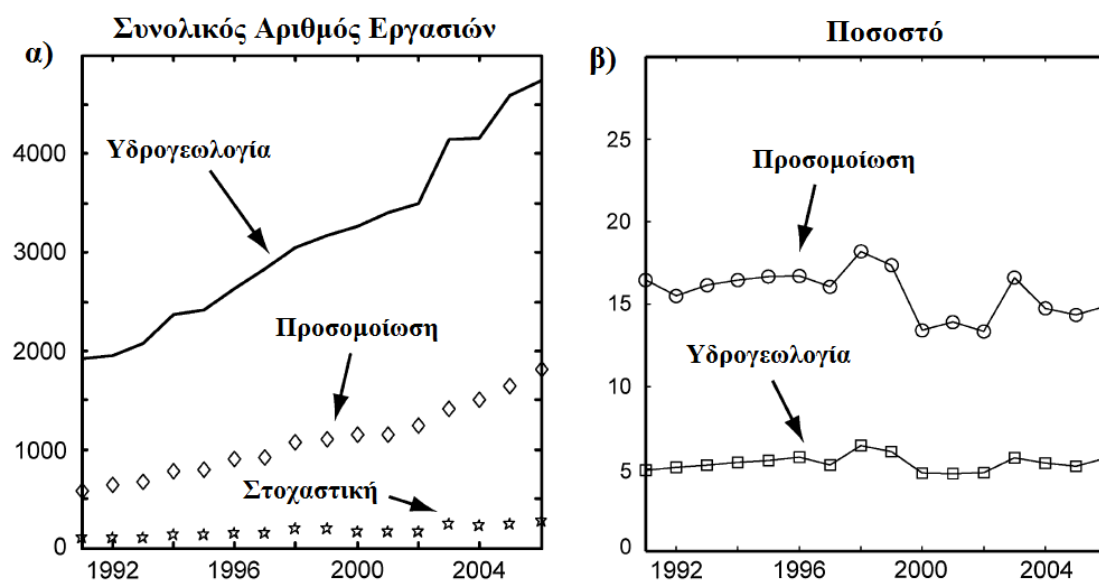
Ο Delhomme (1979) χρησιμοποίησε μια γεωστατιστική προσέγγιση για να μελετήσει τη χωρική μεταβλητότητα σε ένα πραγματικό υδροφορέα. Αντί να παράξει απεικονίσεις της υδροπερατότητας από μια υποτιθέμενη κατανομή πιθανότητας, καθόρισε την πραγματική χωρική δομή αυτής από τα δεδομένα του. Παρήγαγε έτσι εξαρτημένες Monte Carlo απεικονίσεις της υδροπερατότητας για όλο το υπό μελέτη πεδίο. Έτσι, κάθε απεικόνιση ήταν μια αληθοφανή αναπαράσταση της πραγματικότητας, καθώς οι

προσομοιωμένες τιμές της υδροπερατότητας συμφωνούσαν με τις πραγματικές τιμές στα σημεία δειγματοληψίας και είχαν την ίδια χωρική μεταβλητότητα. Δύο προβλήματα μελετήθηκαν. Μια θεωρητική μελέτη που έκανε χρήση τον ιδεατό κεκλιμένο υδροφορέα του Gelhar (1974) και ένα δεύτερο με πραγματικά δεδομένα από έναν υδροφορέα από τη Γαλλία. Ένα σφαιρικό ημιμεταβλητόγραμμα χρησιμοποιήθηκε και η υδροπερατότητα θεωρήθηκε πως είναι λογοκανονικά κατανεμημένη. Στο θεωρητικό πρόβλημα, η εξάρτηση δεν έδειξε καμία μείωση στη διακύμανση των υδραυλικών υψών σε σχέση με τα μη εξαρτημένα αποτελέσματα του Gelhar. Το δεύτερο πρόβλημα έδωσε κάποια σημαντικά συμπεράσματα για την κατανόηση της διαφοροποίησης ανάμεσα στη ντετερμινιστική και στη στοχαστική προσομοίωση. Όταν χρησιμοποιήθηκαν οι παραγόμενες από τη γεωστατιστική προσέγγιση τιμές της υδροπερατότητας, το μοντέλο αδυνατούσε να υπολογίσει τα υδραυλικά ύψη σε περιοχές όπου η κλίση αυτών ήταν σημαντική. Από την άλλη, κάποιες προσομοιώσεις της ροής στηριζόμενες στις εξαρτημένες απεικονίσεις της υδροπερατότητας μπορούσαν να υπολογίσουν υδραυλικά ύψη πολύ κοντά στα παρατηρούμενα. Αυτό έδειξε πως το ημιμεταβλητόγραμμα ήταν σωστό. Ένα άλλο σημαντικό συμπέρασμα ήταν πως η μεγάλη μεταβλητότητα της υδροπερατότητας κοντά σε όρια σταθερού υδραυλικού ύψους δεν έχει καμία επίδραση στα προσομοιωμένα υδραυλικά ύψη.

Μετά την κριτική των Gelhar et al. (1977) στην εργασία του Freeze (1975), οι Smith και Freeze (1979a,b) παρουσίασαν προσομοιώσεις δισδιάστατης και τρισδιάστατης μόνιμης υπόγειας ροής σε οριοθετημένα πεδία με αυτοσυσχετιζόμενες παραμέτρους. Η ένταξη της χωρικής συσχέτισης και η αύξηση της χωρικής διάστασης είναι οι δύο βασικές διαφορές αυτής της εργασίας με την προηγούμενη του Freeze (1975). Η χωρική συσχέτιση της υδραυλικής αγωγιμότητας πραγματοποιήθηκε με ένα πρώτου βαθμού μοντέλο πλησιέστερων γειτόνων (nearest neighbor). Η υδραυλική αγωγιμότητα θεωρήθηκε πως είναι κανονικά κατανεμημένη. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η διακύμανση των παραγόμενων υδραυλικών υψών δεν εξαρτιόταν από τη χωρική διακριτοποίηση του μοντέλου, αρκεί το μέγεθος του μπλοκ να ήταν μικρότερο από το μήκος συσχέτισης. Η διακύμανση των παραγόμενων υδραυλικών υψών ήταν μια αυξητική συνάρτηση της διακύμανσης της $\log K$ και του μήκους συσχέτισης.

Οι Gomez-Hernandez και Gorelick (1989) κατέστρωσαν ένα δισδιάστατο μοντέλο ενός υδροφορέα με ελεύθερη επιφάνεια, αντίστοιχου ενός πραγματικού στην Livermore της Καλιφόρνιας. Η στοχαστική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε για να εκτιμήσει την επίδραση της χωρικής μεταβλητότητας της υδραυλικής αγωγιμότητας, της εκροής και της κατείδυσης στον υπολογισμό των υδραυλικών υψών. Παρήχθησαν προσομοιώσεις Monte Carlo για διαφορετικές δομές χωρικής συσχέτισης υποθέτοντας στασιμότητα και ένα εκθετικό ημιμεταβλητόγραμμα. Για κάθε απεικόνιση Monte Carlo, επιλύθηκε το πρόβλημα της υπόγειας ροής και υπολογίσθηκαν οι μέσες τιμές και οι διακυμάνσεις των προσομοιωμένων υδραυλικών υψών. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως δεν υπάρχει μοναδική ενιαία τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας που μπορεί να χαρακτηρίσει έναν υδροφορέα και να δώσει αξιόπιστα συμπεράσματα κάνοντας επιτακτική την ανάγκη της στοχαστικής προσομοίωσης, η οποία λαμβάνει υπόψη τη χωρική μεταβλητή των παραμέτρων ενός μοντέλου.

Παρόλη τη μεγάλη άνθιση που γνώρισε η στοχαστική προσομοίωση στην υπόγεια υδρολογία, τα τελευταία χρόνια ο αριθμός των δημοσιευμένων εργασιών σε επιστημονικά περιοδικά δεν αυξάνεται γεγονός που έχει απασχολήσει αρκετούς ερευνητές (Dagan, 2002; Renard, 2007). Σύμφωνα με τον Renard (2007), ο αριθμός των εργασιών τόσο της υδρογεωλογίας, όσο και της προσομοίωσής της παραμένει αυξητικός (Σχήμα 2.6), που σημαίνει πως οι νέες γενιές των ερευνητών στην υδρογεωλογία και στην προσομοίωσή της διστάζουν να ασχοληθούν με τη στοχαστική προσομοίωση. Επίσης, η στοχαστική προσομοίωση δεν έχει επεκταθεί και στον χώρο των επαγγελματιών/μελετητών και παραμένει ακόμη αντικείμενο των ερευνητών και των ακαδημαϊκών. Οι σημαντικότεροι λόγοι είναι η έλλειψη γνώσης, η δυσκολία τόσο του θεωρητικού υπόβαθρου, όσο και των μαθηματικών και ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται.



Σχήμα 2. 6. Χρονική εξέλιξη του: α) αριθμού των εργασιών σε διεθνή περιοδικά που σχετίζονται με την υδρογεωλογία, την προσομοίωσή της και τη στοχαστική προσομοίωσή της και β) ποσοστού των εργασιών της στοχαστικής προσομοίωσης σε σχέση με την προσομοίωση και την υδρογεωλογία σύμφωνα με τον Renard (2007)

Εργασίες με βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις πάνω στην αβεβαιότητα και την στοχαστική προσομοίωση των υπόγειων υδατικών συστημάτων είναι των: Neuman, 1984; Gelhar, 1986; Srivastana, 1994; Dagan, 2002; Noetinger et al., 2005; Delhomme and de Marsily, 2006; Renard, 2007; Wu and Zeng, 2013.

2.4. Γεωστατιστική προσέγγιση

Τόσο από τις προηγούμενες αναφορές στις σημαντικές εργασίες, όσο και από τους περιορισμούς της Monte Carlo προσομοίωσης, έχει γίνει αντιληπτό πως είναι απαραίτητη η γνώση της μεταβλητότητας μιας παραμέτρου, όταν αυτή αντιμετωπίζεται στοχαστικά. Αυτό επιτυγχάνεται με τα εργαλεία της γεωστατιστικής προσέγγισης.

Η Γεωστατιστική είναι η επιστήμη που ασχολείται με τη μελέτη φαινομένων που μεταβάλλονται στον χώρο ή/και στον χρόνο. Για τον σκοπό αυτό έχει αναπτυχθεί ένα

σύνολο από προσδιοριστικά και στατιστικά εργαλεία για την κατανόηση και μοντελοποίηση της χωρικής μεταβλητότητας. Την τεχνογνωσία της, τη δανείστηκε από τη βιομηχανία εξόρυξης μεταλλευμάτων και αναζήτησης πετρελαίου, ξεκινώντας με την πρωτοπόρα εργασία του Danie G. Krige (Krige, 1951) στη δεκαετία του '50. Η μαθηματικής της επισημοποίηση ήρθε από τον George Matheron (Matheron, 1962) στις αρχές της δεκαετίας του '60. Σε αυτές τις βιομηχανίες βρήκε έπειτα μεγάλη αποδοχή μέσω επιτυχών εφαρμογών σε περιπτώσεις όπου οι αποφάσεις είχαν μεγάλο οικονομικό ρίσκο και οι λειτουργικές εφαρμογές βασίζονταν σε αποτελέσματα από αραιά χωρικά δεδομένα. Οι εφαρμογές των γεωστατιστικών μεθόδων έχουν από τότε επεκταθεί σε πολλά πεδία που έχουν σχέση με τις επιστήμες της γης.

Το πεδίο της γεωστατιστικής είναι γενικά αφιερωμένο στην ανάλυση και στην εξήγηση της αβεβαιότητας που προέρχεται από μικρό αριθμό δειγμάτων. Οι γεωστατιστικές προσεγγίσεις διαφέρουν από τις πιο κλασικές μεθόδους της στατιστικής ανάλυσης δεδομένων στο ότι δεν είναι εντελώς δεμένες με ένα μοντέλο πληθυσμιακής κατανομής που υποθέτει ότι τα δείγματα ακολουθούν κανονική κατανομή και είναι μη συσχετιζόμενα. Τα περισσότερα δεδομένα των επιστημών της γης, στην πραγματικότητα, δεν ικανοποιούν αυτές τις υποθέσεις καθώς τείνουν συχνά να έχουν μη κανονικές κατανομές και χωρικά συσχετιζόμενα δείγματα. Εφόσον οι κλασικές στατιστικές προσεγγίσεις αφορούν μόνο την εξέταση της στατιστικής κατανομής του δείγματος, οι γεωστατιστικές περιλαμβάνουν τις ερμηνείες τόσο της στατιστικής κατανομής, όσο και της χωρικής συσχέτισης ανάμεσα στα δείγματα. Εξαιτίας αυτών των διαφορών, τα γεωτεχνικά και περιβαλλοντικά προβλήματα είναι πιο αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας τις γεωστατιστικές μεθόδους όταν η ανάλυση της χωρικής κατανομής των δεδομένων επηρεάζει τη λήψη αποφάσεων. Η αποτελεσματικότητα της γεωστατιστικής αυξάνει όταν στα προβλήματα εισέρχεται και ο όρος της επικινδυνότητας. Η χρήση της σε μεγάλα γεωτεχνικά και περιβαλλοντικά προβλήματα έχει αποδείξει ότι η γεωστατιστική είναι ένα δυνατό εργαλείο, που επιτρέπει τον συντονισμό των εργασιών, από την απόκτηση των δεδομένων του πεδίου μέχρι την ανάλυση του σχεδιασμού.

Το μεγαλύτερο επίτευγμα της γεωστατιστικής είναι το ότι μπορεί να προβλέψει τη χωρική κατανομή της υπό μελέτη μεταβλητής. Αυτή η πρόβλεψη συνήθως γίνεται με τη μορφή χαρτών που δείχνουν το μέγεθος και την κατανομή της μεταβλητής. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι της γεωστατιστικής πρόβλεψης : η εκτίμηση (estimation) και η προσομοίωση (simulation). Στη διαδικασία της εκτίμησης παράγεται μια, μοναδική και στατιστικά αρτιότερη εκτίμηση της χωρικής κατανομής της μεταβλητής, βασισμένη στα δεδομένα πεδίου, αλλά και στο μοντέλο, το οποίο αναπαριστά με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο την χωρική συσχέτιση των δεδομένων. Αυτή η μοναδική εκτίμηση παράγεται από την ευρέως γνωστή γεωστατιστική τεχνική με την ονομασία Kriging. Στην προσομοίωση, παράγονται πολλές, ίσης πιθανότητας απεικονίσεις της χωρικής ύπαρξης της μεταβλητής, χρησιμοποιώντας το ίδιο μοντέλο της χωρικής συσχέτισης όπως αυτό προέκυψε από τη μέθοδο Kriging. Οι απεικονίσεις έχουν ρεαλιστική υπόσταση και διατηρούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των δεδομένων. Οι διαφορές ανάμεσα στις πολλαπλές απεικονίσεις παρέχουν ένα μέτρο της χωρικής αβεβαιότητας,

που επιτρέπει σε κάποιον να λύσει προβλήματα επικινδυνότητας, κάτι το οποίο δεν επιτυγχάνεται με την εκτίμηση.

Κατά τη γεωστατιστική προσέγγιση κάθε παράμετρος z του προβλήματος (π.χ υδραυλική αγωγιμότητα, πορώδες, μεταφορικότητα) αντιμετωπίζεται σαν τυχαία μεταβλητή (Random Value ή RV) Z , η κατανομή πιθανότητας της οποίας παριστά την αβεβαιότητα στη γνώση μας για τη z . Ο λόγος για τον οποίο η κάθε παράμετρος αντιμετωπίζεται σαν τυχαία μεταβλητή είναι για να δοθεί μια μαθηματική παράσταση της μεταβολής των ιδιοτήτων της στον χώρο. Μια τυχαία μεταβλητή Z , αντιπροσωπεύει ένα σύνολο πιθανών ενδεχομένων ή καταστάσεων που δηλώνονται με το σύμβολο z_i $i=1,...,N$, όπου N ο αριθμός του συνόλου των καταστάσεων. Κάθε κατάσταση z_i χαρακτηρίζεται από μια πιθανότητα πραγματοποίησης p_i , $i=1,...,N$. Η τυχαία μεταβλητή Z , και πιο συγκεκριμένα η κατανομή της πιθανότητάς της είναι χωρικά εξαρτημένη. Συνεπώς και η παραπάνω δηλώνεται ως $Z(u)$ με το u να είναι το διάνυσμα των χωρικών συντεταγμένων. Η $Z(u)$ εξαρτάται επίσης από το πλήθος των δεδομένων με την έννοια ότι η κατανομή της πιθανότητάς της αλλάζει όσα περισσότερα δεδομένα εισάγονται για την παράμετρο $z(u)$. Αν ο συνολικός αριθμός των καταστάσεων που περιέχει ο πληθυσμός είναι πεπερασμένος, η τυχαία μεταβλητή είναι διακριτή. Χαρακτηριστικά παραδείγματα παραμέτρων που αντιμετωπίζονται ως τυχαίες διακριτές μεταβλητές αποτελούν οι γεωλογικές ιδιότητες ενός πεδίου, όπως ο τύπος του πετρώματος. Αν ο συνολικός αριθμός είναι άπειρος, η τυχαία μεταβλητή είναι συνεχής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα παραμέτρων που αντιμετωπίζονται ως τυχαίες συνεχείς μεταβλητές αποτελούν η υδραυλική αγωγιμότητα, η μεταφορικότητα, το πορώδες, η συγκέντρωση ενός ρύπου κ.α.

Εφόσον στην παρούσα εργασία η παράμετρος αυτή είναι η υδραυλική αγωγιμότητα, γίνεται κατανοητό πως η τυχαία μεταβλητή $Z(u)$ θα είναι στο εξής συνεχής κάτι που θα θεωρείται δεδομένο στις παρακάτω ενότητες.

Επομένως και η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (cumulative distribution function ή cdf) $F(u;z)$ της μεταβλητής $Z(u)$ θα αντιπροσωπεύει τη συνολική πιθανότητα με τη μεταβλητή να παίρνει όλες τις τιμές που είναι μικρότερες ή ίσες από την τιμή z :

$$F(u;z) = \text{Prob}\{Z(u) \leq z\} \quad (2.25)$$

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής ή cdf χαρακτηρίζει πλήρως την τυχαία μεταβλητή $Z(u)$ και μπορεί να δώσει διαστήματα πιθανότητας :

$$\text{Prob}\{Z \in [a,b]\} = F(b) - F(a) \quad (2.26)$$

Ανάλογα με τα διαστήματα πιθανότητας, η πιθανότητα υπέρβασης μιας οποιασδήποτε στάθμης a ορίζεται ως εξής :

$$\text{Prob}\{Z > a\} = \text{Prob}\{\infty > Z > a\} = F(\infty) - F(a) = 1 - F(a) \quad (2.27)$$

Η πιθανότητα υπέρβασης στάθμης είναι στατιστικό μέγεθος με πολλές και χρήσιμες εφαρμογές στα προβλήματα υδρογεωλογίας (πχ στον έλεγχο της περιβαλλοντικής ρύπανσης). Έτσι λοιπόν το p -ποσοστημόριο για μια κατανομή $F(z)$ είναι η τιμή z_p τέτοια ώστε $F(z_p) = p \in [0,1]$, δηλαδή η τιμή z_p που έχει πιθανότητα p να μην την

ξεπερνά η τυχαία μεταβλητή $Z(u)$. Καθορίζοντας την αντίστροφη $F^{-1}(p)$ της cdf προκύπτει :

$$p\text{-ποσοστημόριο } z_p = F^{-1}(p), \text{ με } p \in [0,1] \quad (2.28)$$

και εκφράζοντάς το σε ποσοστό επί της εκατό προκύπτει :

$$p\text{-εκατοστημόριο } z_p = F^{-1}(100p), \text{ με } p \in [0,100] \quad (2.29)$$

με τα πιο γνωστά να είναι ο διάμεσος $M = F^{-1}(0.5)$, και οι άνω και κάτω στάθμες $z_{0.25} = F^{-1}(0.25)$, $z_{0.75} = F^{-1}(0.75)$.

Η αναμενόμενη ή μέση τιμή (mean) για μια συνεχή μεταβλητή $Z(u)$ είναι :

$$E\{Z\} = m = \int_{-\infty}^{+\infty} z dF(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} z f(z) dz \quad (2.30)$$

όπου $F(z)$ είναι η cdf της Z και $f(z)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function ή pdf) της Z , η οποία ισούται με την παράγωγο της $F(z)$: $f(z) = F'(z)$.

Η διασπορά (variance) της Z ορίζεται ως η αναμενόμενη τετραγωνική απόκλιση της Z από τη μέση τιμή m :

$$\text{Var}\{Z\} = \sigma^2 = E\{|Z-m|^2\} = \int_{-\infty}^{+\infty} (z-m)^2 dF(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} (z-m)^2 f(z) dz \quad (2.31)$$

Η τυπική απόκλιση (standard deviation) σ , όπως φαίνεται και από τα παραπάνω είναι ίση με την τετραγωνική ρίζα της διασποράς.

Σημαντικό ρόλο στη γεωστατιστική προσέγγιση της τυχαίας μεταβλητής Z παίζει η κατανομή της πιθανότητάς της. Οι βασικές κατανομές πιθανότητας είναι : η διωνυμική, η Poisson, η πολωνυμική, η ομοιόμορφη, η Βήτα, η κανονική, η λογο-κανονική, η X^2 , η t (Student), η εκθετική και η Weibull. Εδώ θα αναπτυχθούν μόνο η κανονική και η λογοκανονική κατανομή διότι αυτές χρησιμοποιούνται για τη γεωστατιστική προσέγγιση της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Η κανονική κατανομή είναι επίσης γνωστή και σαν κατανομή Gauss. Χαρακτηρίζεται πλήρως από τη μέση τιμή m και την τυπική απόκλιση σ . Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ή pdf ισούται με :

$$g(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-m}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2.32)$$

Στην περίπτωση όπου $m = 0$ και $\sigma^2 = 1$ καλείται τυπική κανονική κατανομή και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ή pdf ισούται με :

$$g_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{z^2}{2} \right] \quad (2.33)$$

Η αθροιστική κατανομή πιθανότητας δεν επιδέχεται κλειστή αναλυτική μορφή:

$$G(z) = \int_{-\infty}^z g(u)du = G_0\left(\frac{z-m}{\sigma}\right) \quad (2.34)$$

όπου $G_0(z)$ είναι η cdf της τυπικής κατανομής ίση με :

$$G_0(z) = \int_{-\infty}^z g_0(u)du \quad (2.35)$$

Η κανονική κατανομή είναι συμμετρική ως προς τη μέση τιμή m , έτσι : $m = M$ και $g(z+m) = g(z-m)$, οπότε $G(m-z) = 1-G(m+z)$ για όλα τα z . Επίσης $z_{1-p} = 2m - z_p$, για $p \in [0,0.5]$.

Η επιτυχία της κατανομής Gauss οφείλεται στο γεγονός ότι στην πράξη οι παρατηρούμενες μεταβολές αντιστοιχούν σε ομογενοποιημένες μεταβλητές που προκύπτουν από τον συνδυασμό διακυμάνσεων μικρότερης κλίμακας. Αυτές οι ομογενοποιημένες μεταβλητές αντιπροσωπεύουν αθροίσματα ή μέσους όρους στοιχειωδών τυχαίων μεταβλητών. Για παράδειγμα, η θερμοκρασία σε μια περιοχή της Ελλάδας (π.χ Βόλος) αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή ως προς τις τοπικές διακυμάνσεις. Επομένως μπορούν να αναζητηθούν τα αίτια για την πανταχού παρουσία της κανονικής κατανομής στη συμπεριφορά της κανονικής κατανομής για ομογενοποιημένες μεταβλητές. Το μαθηματικό πλαίσιο που προσδιορίζει την κατανομή πιθανότητας για τις ομογενοποιημένες μεταβλητές είναι το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα (Central Limit Theorem).

Σύμφωνα με το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα αν υπάρχουν n μεταβλητές Z_i οι οποίες είναι ανεξάρτητες και ισόνομες (δηλαδή έχουν την ίδια κατανομή) με μέση τιμή m και

πεπερασμένη τυπική απόκλιση σ , ορίζουν άθροισμα $Z_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n Z_i$ και μέσο όρο

$\bar{Z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i$. Οι Z_{tot} , \bar{Z} είναι επίσης τυχαίες μεταβλητές που χαρακτηρίζονται

αντίστοιχα από κατανομές πιθανότητας. Για μεγάλες τιμές του n , ισχύουν οι επόμενες ιδιότητες :

1. Η κατανομή της Z_{tot} συγκλίνει στην κανονική κατανομή με μέση τιμή nm και τυπική απόκλιση $\sigma\sqrt{n}$.
2. Η κατανομή της \bar{Z} συγκλίνει επίσης στην κανονική κατανομή με μέση τιμή m και τυπική απόκλιση σ/\sqrt{n} .

Η κανονική κατανομή είναι πολύ εύχρηστη γιατί χαρακτηρίζεται πλήρως από μόνο δύο παραμέτρους τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση. Επίσης είναι συμμετρική και επιτρέπει την επεξεργασία και αρνητικών τιμών. Στην πράξη όμως πολλές πειραματικές κατανομές είναι ασύμμετρες με μέση τιμή διαφορετική από το διάμεσο. Πολλές μεταλλαγές της κανονικής κατανομής χρησιμοποιήθηκαν για να αντιμετωπίσουν το παραπάνω πρόβλημα. Η πιο ευρεία διαδεδομένη είναι η λογαριθμική κατανομή.

Η λογοκανονική κατανομή συνδέεται με την κανονική κατανομή ως εξής : Μια τυχαία μεταβλητή $Z > 0$ ακολουθεί την λογοκανονική κατανομή, όταν ο λογάριθμος της $Y = \log Z$ ακολουθεί την κανονική κατανομή και αντιστρόφως. Χαρακτηρίζεται πλήρως :

- είτε από τη μέση τιμή m και την τυπική απόκλιση σ^2 της κανονικής κατανομής και καλούνται αριθμητικές παράμετροι,
- είτε από τη μέση τιμή α και την τυπική απόκλιση β^2 του λογαριθμικού μετασχηματισμού $Y = \log Z$ και καλούνται λογαριθμικές παράμετροι.

Η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της λογοκανονικής κατανομής δίνεται από την εξίσωση :

$$Prob\{Z \leq z\} = G_z(z) = G_0\left(\frac{\ln z - \alpha}{\beta}\right) \text{ για όλα τα } z > 0 \quad (2.36)$$

όπου $G_0(*)$ είναι η cdf της τυπικής κανονικής κατανομής.

Ενώ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της λογοκανονικής κατανομής ισούται με:

$$g_z(y) = G'_z(y) = \frac{1}{\beta y} g_0\left(\frac{\ln y - \alpha}{\beta}\right) \quad (2.37)$$

όπου $g_0(*)$ είναι η pdf της τυπικής κανονικής κατανομής.

Οι μαθηματικές σχέσεις ανάμεσα στις μαθηματικές και στις λογαριθμικές παραμέτρους είναι :

$$\begin{cases} m = e^{\alpha + \beta^2/2} \\ \sigma^2 = m^2 [e^{\beta^2} - 1] \end{cases} \quad \begin{cases} \alpha = \ln m - \beta^2/2 \\ \beta^2 = \ln \left(1 + \frac{\sigma^2}{m^2} \right) \end{cases} \quad (2.38)$$

Εάν v_p είναι το p - ποσοστημόριο για μια τυπική κανονική κατανομή δηλ., $v_p = G_0^{-1}(p)$, $p \in [0,1]$ τότε το p - ποσοστημόριο για την λογοκανονική είναι : $y_p = e^{\alpha + \beta v_p}$.

Μέχρι στιγμής παίρναμε υπόψη μόνο μια τυχαία μεταβλητή κάθε φορά είτε αυτή ήταν

η $Z(u)$ είτε το άθροισμα $Z_{tot} = \sum_{i=1}^n Z_i$ των n τυχαίων μεταβλητών $Z(u)$. Όπως στις

περισσότερες επιστήμες, έτσι και στη γεωστατιστική ο παράγοντας της εξάρτησης της μιας μεταβλητής X από μια άλλη Y παίζει σημαντικό ρόλο. Οι μεταβλητές αυτές πιθανόν να αντιστοιχούν στην ίδια ποσότητα (υδραυλική αγωγιμότητα) σε δύο διαφορετικά σημεία του χώρου ή σε δύο διαφορετικές ποσότητες (πορώδες, μεταφορικότητα) που αναφέρονται στο ίδιο ή σε διαφορετικά σημεία στο χώρο.

Στην παρούσα εργασία ισχύει η πρώτη περίπτωση και αυτό θα νοείται στην περαιτέρω παρουσίαση.

Όταν η αθροιστική συνάρτηση κατανομής ή cdf αναφέρεται συγκεκριμένα για ένα σύνολο πληροφοριών (n), π.χ το σύνολο (n) να αποτελείται από γειτονικές τιμές $Z(u_a)$, $a=1, \dots, n$, τότε η τυχαία μεταβλητή Z είναι εξαρτημένη (conditional) στο σύνολο n και

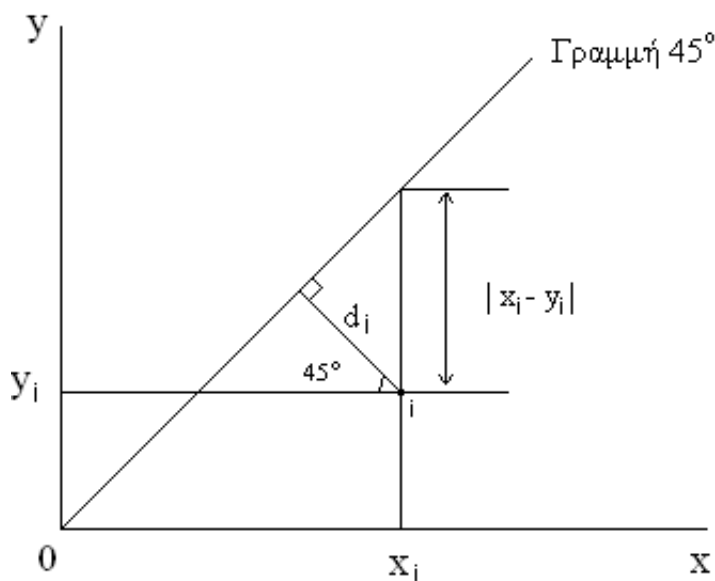
η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (cdf) της καλείται εξαρτημένη αθροιστική συνάρτηση κατανομής ή ccdf:

$$F(u; z|(n)) = \text{Prob}\{Z(u) \leq z|(n)\} \quad (2.39)$$

Η Εξίσωση 2.25 μοντελοποιεί την αβεβαιότητα για την άγνωστη τιμή $z(u)$ χωρίς τη χρήση των δεδομένων (n) , ενώ η Εξίσωση 2.39 μοντελοποιεί την αβεβαιότητα για την $z(u)$ λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των δεδομένων (n) . Ο μεγάλος στόχος κάθε αλγόριθμου πρόβλεψης είναι να μετατρέψει αρχικά μοντέλα όπως της Εξίσωσης 2.25 σε μεταγενέστερα όπως της Εξίσωσης 2.39. Σημειώστε ότι η ccdf είναι μια συνάρτηση της θέσης u , της γεωμετρικής παράταξης των θέσεων των δεδομένων u_a , $a=1, \dots, n$ και των τιμών των δεδομένων. Έτσι λοιπόν ο στόχος της γεωστατιστικής προσέγγισης είναι να μελετήσει/μοντελοποιήσει τον βαθμό συσχέτισης ή εξάρτησης των δύο ή περισσότερων μεταβλητών. Και όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι μεταβλητές αυτές θα αποτελούν στη δική μας περίπτωση τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας σε διάφορα σημεία του χώρου.

Τα εργαλεία που χρησιμοποιεί η γεωστατιστική για τον παραπάνω σκοπό είναι το μεταβλητόγραμμα $2\gamma_{XY}$ ή ημιμεταβλητόγραμμα γ_{XY} , η συμμεταβλητότητα $\text{Cov}\{X, Y\}$ και ο συντελεστής συσχέτισης ρ_{XY} .

Ο απλούστερος τρόπος για την πρώτη εκτίμηση της εξάρτησης δύο μεταβλητών είναι το διάγραμμα διασποράς, δηλαδή η δισδιάστατη γραφική παράσταση που προκύπτει από τα ζεύγη σημείων (x_i, y_i) (Σχήμα 2.7). Το διάγραμμα διασποράς είναι ότι και το ιστόγραμμα, στην περίπτωση μιας μεταβλητής. Ο βαθμός εξάρτησης των δύο μεταβλητών X και Y χαρακτηρίζεται από τη διασπορά των σημείων γύρω από τη γραμμή 45° . Όταν τα σημεία (x_i, y_i) εφαρμόσουν ακριβώς πάνω στη γραμμή τότε είναι πλήρως εξαρτημένες.



Σχήμα 2. 7. Το ζεύγος των σημείων (x_i, y_i) σε ένα διάγραμμα διασποράς.

Η ροπή αδράνειας (moment of inertia) είναι η μέση τιμή του τετραγώνου της διαφοράς δύο μεταβλητών και ορίζεται ως εξής :

$$\gamma_{XY} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [x_i - y_i]^2 \quad (2.40)$$

Η ροπή αδράνειας καλείται ημιμεταβλητόγραμμα (semivariogram). Αν $X=Y$ το ημιμεταβλητόγραμμα μηδενίζεται. Υψηλές τιμές του ημιμεταβλητογράμματος δηλώνουν σημαντική απόκλιση μεταξύ των τιμών των μεταβλητών X και Y . Επομένως το ημιμεταβλητόγραμμα είναι ένα μέτρο της διασποράς των δύο μεταβλητών. Το μεταβλητόγραμμα $2\gamma_{XY}$ είναι απλά το διπλάσιο του ημιμεταβλητογράμματος. Στη γεωστατιστική πιο ευρέως διαδεδομένο είναι το ημιμεταβλητόγραμμα.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι όπως και στην περίπτωση της μια μεταβλητής, έτσι και σε αυτήν που αντιμετωπίζονται δύο ή παραπάνω μεταβλητές οι στατιστικές παράμετροι ορίζονται αναλόγως το ίδιο.

Έτσι η μέση τιμή ορίζεται :

$$E\{XY\} = \int \int_{-\infty}^{+\infty} xy d^2 F_{XY}(x, y) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} xy f_{XY}(x, y) dx dy \quad (2.41)$$

στην πράξη υπολογίζεται από : $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i y_i$ και όπου η $f_{XY}(x, y) = \frac{d^2 F_{XY}(x, y)}{dx dy}$ είναι η

κοινή pdf και $d^2 F_{XY}(x, y) = f_{XY}(x, y)$ είναι η πιθανότητα εμφάνισης του κοινού αποτελέσματος $\{X = x \pm dx, Y = y \pm dy\}$.

Η μέση τιμή $E\{XY\}$ (Εξίσωση 2.41) καλείται μη κεντρικός συντελεστής διασποράς των δύο τυχαίων μεταβλητών X και Y . Ο κεντρικός συντελεστής συμμεταβλητότητας (covariance) ισούται με :

$$Cov\{X, Y\} = \sigma_{XY} = E\{[X - m_X] \cdot [Y - m_Y]\} = E\{XY\} - m_X \cdot m_Y \quad (2.42)$$

στην πράξη υπολογίζεται ως εξής : $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - m_X) \cdot (y_i - m_Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i y_i - m_X \cdot m_Y$ με

$$m_X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad m_Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i.$$

Η διασπορά μιας μεταβλητής, όπως αυτή ορίστηκε στην Εξίσωση 2.31, δεν είναι τίποτε άλλο από τον συντελεστή αυτομεταβλητότητας (autocovariance) της μεταβλητής αυτής με τον εαυτό της :

$$\sigma^2_X = Var\{X\} = Cov\{X, X\} = E\{[X - m_X]^2\} \geq 0 \quad (2.43)$$

Παρατηρούμε ότι παρόλο που οι διασπορές σ^2_X και σ^2_Y είναι απαραίτητα θετικές, ο συντελεστής συμμεταβλητότητας παίρνει και αρνητικές τιμές στην περίπτωση που οι τιμές των δύο τυχαίων μεταβλητών δεν μεταβάλλονται με παρόμοιο τρόπο, δηλαδή όταν οι υψηλές τιμές της μιας τείνουν να προσεγγίσουν τις χαμηλές τιμές της άλλης και αντίστροφα.

Από την Εξίσωση 2.42 είναι προφανές πως η τιμή του συντελεστής συµμεταβλητότητας εξαρτάται από τις μονάδες των X και Y . Για να απαλλαγεί από αυτή τη δέσµευση, ορίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης (coefficient of correlation) ρ_{XY} :

$$\rho_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} = \frac{Cov\{X,Y\}}{\sqrt{Var\{X\} \cdot Var\{Y\}}} \quad E [-1,+1] \quad (2.44)$$

Το μεταβλητόγραμμα γ_{XY} μαζί με το ημιμεταβλητόγραμμα $2\gamma_{XY}$ είναι μέσα μέτρησης της μεταβλητότητας, ενώ ο συντελεστής συµμεταβλητότητας σ_{XY} και ο συντελεστής συσχέτισης ρ_{XY} είναι μέσα μέτρησης της ομοιότητας.

Τόσο το μεταβλητόγραμμα γ_{XY} όσο και ο συντελεστής συµμεταβλητότητας σ_{XY} εξαρτώνται από το γραμμικό μετασχηματισμό των μεταβλητών X, Y , είτε αυτός εκφράζεται ως άθροισμα π.χ $X+b$, είτε ως γινόμενο aX . Για το λόγο αυτό ζητείται μια πιο «φυσική» (intrinsic) έκφραση απαλλαγμένη από τις μονάδες. Αυτό πραγματοποιείται με την αλλαγή των μεταβλητών σε νέες : $X' = (X - m_X)/\sigma_X$ και $Y' = (Y - m_Y)/\sigma_Y$.

Οι στατιστικές τους παράμετροι είναι :

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{X'} = m_{Y'} = 0, \quad \sigma_{X'}^2 = \sigma_{Y'}^2 = 1, \\ \sigma_{X'Y'} = E \left\{ \frac{X - m_X}{\sigma_X} \cdot \frac{Y - m_Y}{\sigma_Y} \right\} = \rho_{XY} E [-1,+1] \\ \gamma_{X'Y'} = 1 - \rho_{XY} \quad E [0,2] \end{array} \right. \quad (2.45)$$

2.4.1. Μεταβλητόγραμμα – Ημιμεταβλητόγραμμα

Εφόσον οι τυχαίες μεταβλητές X, Y αντιστοιχούν στις τιμές που παίρνει η υδραυλική αγωγιμότητα σε δύο διαφορετικές θέσεις μέσα στο πεδίο μελέτης A , τότε αν h είναι το διάνυσμα του χώρου που ενώνει τα δύο σημεία, αυτές μπορούν να δηλωθούν ως : $X = Z(u)$, $Y = Z(x+h)$. Αυτή η περίπτωση είναι και η πιο σημαντική για τα προβλήματα παρεμβολής, στα οποία μια παράμετρος (υδραυλική αγωγιμότητα) $Z(u)$, ανήκει στο πεδίο A , πρέπει να έχει μια συγκεκριμένη τιμή σε κάθε σημείο u , με τα δεδομένα να προέρχονται από έναν περιορισμένο αριθμό τιμών της.

Συγκεντρώνοντας όλα τα ζεύγη $n(h)$ των δεδομένων που υπάρχουν μέσα στο πεδίο μελέτης A , της ιδιότητας Z και τα οποία χαρακτηρίζονται από την ίδια διανυσματική απόσταση h μπορεί να υπολογιστεί τελικά το μεταβλητόγραμμα του πεδίου A . Αυτό είναι λοιπόν το τελικό μεταβλητόγραμμα το οποίο λαμβάνει υπόψη της η γεωστατιστική επιστήμη για την περαιτέρω επεξεργασία του πεδίου μελέτης. Κι αυτό γιατί όπως αναφέρθηκε λαμβάνει υπόψη όλες τις τυχαίες μεταβλητές που χαρακτηρίζουν την εκάστοτε ιδιότητα.

Το μεταβλητόγραμμα ουσιαστικά αποτελεί ταυτότητα για την ιδιότητα Z στο πεδίο A . Μέσω αυτού μπορεί ο μελετητής να εξάγει ένα πρώτο συμπέρασμα για τη

μεταβλητότητα της ιδιότητας και χωρίς αυτό δεν πραγματοποιείται η γεωστατιστική προσέγγιση.

Ο ακριβής ορισμός που ακολουθεί για το μεταβλητόγραμμα είναι :

Το μεταβλητόγραμμα (variogram) αντικαθιστά την ευκλείδεια απόσταση h με μια θεμελιώδη απόσταση $2\gamma(h)$, η οποία είναι συγκεκριμένη στη συμπεριφορά και στο πεδίο μελέτης. Η απόσταση του μεταβλητογράμματος μετρά το μέσο βαθμό της ανομοιοότητας ανάμεσα σε μια «χωρίς δειγματοληψία» τιμή $z(u)$ και σε μια κοντινή δεδομένη τιμή. Έτσι π.χ στην περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη έστω μόνο δύο γνωστές τιμές $z(u+h)$ και $z(u+h')$ σε γνωστές θέσεις, η πιο «διαφορετική» τιμή θα δώσει και λιγότερο βάρος στην εκτίμηση της $z(u)$. (Deutsch, Journel, 1992).

Η εξίσωση που την περιγράφει είναι η παρακάτω :

$$\gamma_{Z(x),Z(x+h)} = 2\gamma'_A(h) = \frac{1}{n(h)} \sum_{a=1}^{n(h)} [z(x_a) - z(x_a + h)]^2 \quad (2.46)$$

Ο συμβολισμός $2\gamma'_A(h)$ δηλώνει το πειραματικό μεταβλητόγραμμα του πεδίου και είναι αυτό που για το οποίο τόσος λόγος έγινε παραπάνω χωρίς να δηλώνεται έτσι. Αυτός ο διαχωρισμός γίνεται διότι στη γεωστατιστική προσέγγιση, αφού κατασκευασθεί το παραπάνω πειραματικό μεταβλητόγραμμα, το επόμενο βήμα είναι να προσομοιωθεί με ένα έτοιμο/τυποποιημένο μοντέλο μεταβλητόγραμμα, οι μορφές του οποίου θα αναλυθούν παρακάτω.

Όπως η τυχαία μεταβλητή $Z(x)$ και η κατανομή της χαρακτηρίζουν την αβεβαιότητα για την τιμή της στη θέση x , έτσι και η τυχαία συνάρτηση $Z(x)$, $x \in A$, που καθορίζεται ως το σύνολο των εξαρτημένων RV, χαρακτηρίζει την κοινή (joint) χωρική αβεβαιότητα στο πεδίο A . Το μεταβλητόγραμμα $2\gamma'_A(h)$ αυτής της τυχαίας συνάρτησης (Random Function ή RF) χαρακτηρίζει τον βαθμό της χωρικής μεταβλητότητας ανάμεσα σε δύο RVs $Z(x)$ και $Z(x+h)$ που απέχουν διανυσματική απόσταση ίση με h .

Για να μοντελοποιηθεί όμως το πειραματικό μεταβλητόγραμμα $2\gamma'_A(h)$ από το θεωρητικό/μοντέλο μεταβλητόγραμμα $\gamma(h)$, πρέπει να γίνουν κάποιες υποθέσεις για την ιδιότητα Z . Κι αυτό γιατί το πειραματικό μεταβλητόγραμμα $2\gamma'_A(h)$ εξαρτάται τόσο από τη διανυσματική απόσταση h των σημείων, όσο και από τις θέσεις x_i αυτών, ενώ το μοντέλο μεταβλητόγραμμα δεν πρέπει να εξαρτάται από θέσεις x_i των μεταβλητών, διότι θα χαρακτηρίζει πλέον όλο το πεδίο. Με άλλα λόγια το θεωρητικό μεταβλητόγραμμα θα εξαρτάται μόνο από τη διανυσματική απόσταση h των σημείων των RVs.

Η υπόθεση αυτή καλείται στασιμότητα (stationarity). Σύμφωνα με αυτήν :

1. Η μέση τιμή της ιδιότητας Z είναι σταθερή για όλο το πεδίο, δηλαδή είναι ανεξάρτητη της θέσης x . Άρα $E[Z(x+h)] = E[Z(x)] = m$ για όλα τα $x \in A$.
2. Η συνάρτηση συμμεταβλητότητας $C(h)$ της ιδιότητας Z δεν είναι πλέον συνάρτηση της θέσης x , αλλά μόνο της απόστασης h .

Επομένως :

$$\begin{aligned}
2\gamma(h) &= E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\} = [E\{Z^2(x)\} - m^2] + [E\{Z^2(x+h)\} - m^2] - \\
&2[E\{Z(x)Z(x+h)\} - m^2] = \text{Var}\{Z(x)\} + \text{Var}\{Z(x+h)\} - 2\text{Cov}\{Z(x), Z(x+h)\} \\
&= 2[C(0) - C(h)]
\end{aligned}$$

Άρα :

$$\gamma(h) = -C(h) + C(0) \quad (2.47)$$

Που σημαίνει πως το θεωρητικό ημιμεταβλητόγραμμα ισούται με το αρνητικό της συνάρτησης συµμεταβλητότητας συν μια σταθερά που όπως θα δούµε και παρακάτω για μεγάλες τιμές του ημιμεταβλητογράµµατος ισούται με τη διασπορά σ^2 . Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η στασιμότητα είναι μια ιδιότητα της RF $Z(x)$ και όχι ιδιότητα της χωρικής κατανομής των z -τιμών στο πεδίο A .

Η ιδέα λοιπόν της γεωστατιστικής προσέγγισης συνοψίζεται στα τέσσερα παρακάτω βήματα:

- i. Καθορισμός του πεδίου A , το οποίο όμως πρέπει να θεωρηθεί στάσιμο για την εξαγωγή όλων των απαραίτητων στατιστικών παραμέτρων.
- ii. Εξέταση όλων των δεδομένων του πεδίου A για τον υπολογισμό του πειραματικού μεταβλητογράµµατος / ημιμεταβλητογράµµατος.
- iii. Εξομάλυνση και ολοκλήρωση του πειραματικού μεταβλητογράµµατος / ημιμεταβλητογράµµατος από το μοντέλο μεταβλητόγραμμα / ημιμεταβλητόγραμμα.
- iv. Εφαρμογή των μεθόδων παρεμβολής με τη χρήση του μοντέλου μεταβλητογράµµατος / ημιμεταβλητογράµµατος. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της μεγάλης αξιοπιστίας της είναι η Kriging. Αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιήθηκε και στην εν λόγω έρευνα.

2.4.2. Kriging

Πολλές γεωλογικές και γεωτεχνικές έρευνες χαρακτηρίζονται από μεροληπτικά (biased) δεδομένα πεδίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα δεδομένα να είναι συσχετιζόμενα (correlated) και σε συστοιχία (clustered). Η γεωστατιστική αναγνωρίζει αυτές τις δυσκολίες και παρέχει εργαλεία ποικίλων μορφών χωρικής εκτίμησης (spatial simulation). Αυτά τα εργαλεία καλούνται Kriging στη μνήμη του D. G. Krige, ενός Νοατιοαφρικανού μηχανικού που ήταν πρωτοπόρος στη χρήση των σταθμισμένων μέσων όρων (weighted moving averages) για την αξιολόγηση των μεταλλευμάτων.

Η μέθοδος Kriging υπερτερεί σε σχέση με τις άλλες μεθόδους παρεμβολής για αυτό και την προτιμούν οι περισσότεροι μελετητές. Κι αυτό γιατί είναι η μόνη μέθοδος που ενσωματώνει κατευθείαν το μοντέλο της χωρικής μεταβλητότητας των δεδομένων. Αυτό επιτρέπει στη δημιουργία χαρτών με διαφορετικά σενάρια παρεμβολής. Τα κριτήρια εκτίμησης της Kriging στηρίζονται σε καλά καθορισμένες στατιστικές συνθήκες, οι οποίες υπερτερούν των άλλων μεθόδων. Επιπλέον η αυτόματη

αποδέσμευση (decluster) των δεδομένων που γίνεται από την Kriging, την καθιστά κατάλληλη για την επεξεργασία των γεωλογικών και γεωτεχνικών μετρήσεων. Επίσης η μέθοδος αυτή παρέχει και ένα μέτρο εκτίμησης της ακρίβειας των παρεμβλλόμενων τιμών μέσω των διαφορών εκτίμησης, οι οποίες παρέχουν δύο στατιστικά εργαλεία : i) κάθε εκτίμηση συνοδεύεται από μια διακύμανση και ii) η διακύμανση αυτή δεν εξαρτάται από ξεχωριστές παρατηρήσεις.

Έστω $Z(x)$ είναι η παράμετρος που θα υποστεί την χωρική ανακατανομή (π.χ υδραυλική αγωγιμότητα, μεταφορικότητα κ.α), με το x να είναι το διάνυσμα των συντεταγμένων στον χώρο. Τοπικές τιμές της παραμέτρου είναι διαθέσιμες σε n διαφορετικές θέσεις στο πεδίο μελέτης A , και καλούνται $Z_i = Z(x_i)$, $i=1, \dots, n$. Το πρόβλημα της παρεμβολής είναι το πως θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές Z_i για την εκτίμηση μιας άλλης τιμής Z_0 στη θέση x_0 . Η βασική ιδέα της Kriging στηρίζεται στη γραμμική παλινδρόμηση σύμφωνα με την οποία γίνεται η εκτίμηση της Z_0 , η οποία καλείται Z_0^* . Αλλά η Kriging αποτελεί την πιο εξελιγμένη μορφή γιατί και ελαχιστοποιεί τη διαφορά $Z_0^* - Z_0$, και είναι αμερόληπτη (unbiased).

Θεωρήστε μια άγνωστη τιμή z_0 ως την τιμή εξόδου της τυχαίας μεταβλητής (RV) Z_0 . Οι n τιμές z_i , $i=1, \dots, n$ είναι οι αντίστοιχες τιμές εξόδου των n RVs Z_i , $i=1, \dots, n$. Οι $n+1$ RVs Z_0, Z_1, \dots, Z_n χαρακτηρίζονται από :

- τους μέσους τους $E\{Z_i\}=m_i$, $i=1, \dots, n$
- τους συντελεστές συμεταβλητότητας $Cov\{Z_i, Z_j\}=E\{Z_i, Z_j\} - m_i m_j = C_{ij}$ για όλα τα $i, j = 0, \dots, n$.

Οι $n+1$ διακυμάνσεις δεν είναι άλλες από τους συντελεστές αυτομεβλητότητας $Var\{Z_i\} = E\{Z_i^2\} - m_i^2 = C_{ii}$

Ο συντελεστής συσχέτισης δύο οποιοδήποτε μεταβλητών Z_i, Z_j είναι:

$$\rho_{i,j} = \frac{C_{ij}}{\sqrt{C_{ii} \cdot C_{jj}}} \in [-1, 1] \quad (2.48)$$

Επιπροσθέτως, πρέπει να γίνει διαχωρισμός του πίνακα \underline{K} ($n \times n$) των συντελεστών διασποράς των δεδομένων

$$K = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

από τον πίνακα \underline{k} ($n \times 1$) των συντελεστών διασποράς των άγνωστων

$$k = \begin{bmatrix} C_{10} \\ C_{20} \\ \vdots \\ C_{n0} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Έτσι λοιπόν η άγνωστη τιμή z_0 εκτιμάται από το γραμμικό συνδυασμό των n δεδομένων και της παραμέτρου λ_0 :

$$z_0^* = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (2.51)$$

Αντίστοιχα ο γραμμικός συνδυασμός των n τυχαίων μεταβλητών Z_i είναι και αυτός μια τυχαία μεταβλητή και καλείται εκτιμητής :

$$Z_0^* = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i \quad (2.52)$$

Οι άγνωστοι του προβλήματος είναι οι συντελεστές βαρύτητας λ_i , οι οποίοι εξαρτώνται τόσο από τη θέση x_0 , όσο και από τις θέσεις x_i . Το πραγματικό σφάλμα $z_0 - z_0^*$ είναι άγνωστο και δεν μπορεί να προσδιοριστεί. Όμως, κάποια στατιστικά χαρακτηριστικά του λάθους των τυχαίων μεταβλητών $Z_0 - Z_0^*$ μπορούν να υπολογιστούν.

Η μέση τιμή του λάθους των τυχαίων μεταβλητών είναι :

$$E\{Z_0 - Z_0^*\} = E\{Z_0\} - E\{Z_0^*\} = E\{Z_0\} - \lambda_0 - \sum_{i=1}^n \lambda_i E\{Z_i\} = m_0 - \lambda_0 - \sum_{i=1}^n \lambda_i m_i$$

Για να είναι αμερόληπτη η μέθοδος αυτή πρέπει η μέση τιμή του σφάλματος των τυχαίων μεταβλητών να είναι μηδέν, έτσι ο συντελεστής βαρύτητας λ_0 ισούται με :

$$\lambda_0 = m_0 - \sum_{i=1}^n \lambda_i m_i \quad (2.53)$$

Επιπλέον :

$$Z_0^* = m_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z_i - m_i] \quad (2.54)$$

Ο αμερόληπτος εκτιμητής Z_0^* εμφανίζεται σαν το αποτέλεσμα της γραμμικής εκτίμησης της διαφοράς $[Z_0 - m_0]$ από την διαφορά των τυχαίων μεταβλητών των δεδομένων $[Z_i - m_i]$:

$$[Z_0^* - m_0] = [Z_0 - m_0]^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z_i - m_i] \quad (2.55)$$

Μένει λοιπόν ο υπολογισμός των n συντελεστών βαρύτητας λ_i , $i=1, \dots, n$. Αυτό θα γίνει μέσω της ελαχιστοποίησης του σφάλματος της διασποράς. Θεωρώντας το σφάλμα των $\{Z_0 - Z_0^*\}$ ως γραμμικό συνδυασμό Y των $(n+1)$ τυχαίων μεταβλητών, έχουμε :

$$Y = Z_0 - Z_0^* = [Z_0 - m_0] - [Z_0 - m_0]^* = \sum_{i=0}^n i_i [Z_i - m_i] \quad (2.56)$$

$$\text{με} \quad \begin{cases} i_0 = 1 \\ i_i = -\lambda_i, i=1, \dots, n \end{cases}$$

Το σφάλμα της διασποράς εκφράζεται ως το διπλό άθροισμα των συντελεστών συνδιακύμανσης C_{ij} :

$$\text{Var}Y = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n i_i j_j C_{ij} \quad (2.57)$$

Τα n βάρη $i_i = \lambda_i$, $i=1, \dots, n$ είναι αυτά τα οποία θα ελαχιστοποιήσουν το σφάλμα της διασποράς $\text{Var}Y$. Αυτό γίνεται με το μηδενισμό των n μερικών διαφορών του σφάλματος $\text{Var}Y$ σε σχέση με την καθεμία από τις n παραμέτρους i_i , $i=1, \dots, n$:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \text{Var}Y}{\partial i_i} = \sum_{j=0}^n i_j C_{ij} = i_0 C_{i0} + \sum_{j=1}^n i_j C_{ij} = C_{i0} - \sum_{j=1}^n \lambda_j C_{ij} = 0, \text{ για όλα τα } i=1, \dots, n \quad (2.58)$$

Η κατάληξη της παραπάνω εξίσωση δεν είναι άλλη από το τελικό σύστημα των εξισώσεων γραμμικής παλινδρόμησης ή καλύτερα στο σύστημα του Απλού (Simple) Kriging:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j C_{ij} = C_{i0}, \quad i=1, \dots, n \quad (2.59)$$

Το ελαχιστοποιημένο λάθος της διασποράς $\text{Var}Y$ καλείται «Simple Kriging» διασπορά και ισούται με :

$$\begin{aligned} \sigma_{SK}^2 = \text{Var}\{Z_0 - Z_o^*\} &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n i_i i_j C_{ij} = \underbrace{C_{00}}_{i=0} - \underbrace{\sum_{j=1}^n \lambda_j C_{0j}}_{i \neq 0, j=0} - \underbrace{\sum_{i=1}^n \lambda_i C_{i0}}_{i \neq 0, j=0} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C_{ij} = \\ &= C_{00} - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{i0} + \sum_{i=1}^n \lambda_i \left[\sum_{j=1}^n \lambda_j C_{ij} = C_{i0} \right] \end{aligned}$$

Τελικά :

$$\sigma_{SK}^2 = \text{Var}\{Z_0 - Z_o^*\} = C_{00} - \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{i0} \geq 0 \quad (2.60)$$

Η Εξίσωση 2.59 γράφεται σε μορφή πινάκων ως εξής :

$$\underline{\mathbf{K}} * \underline{\lambda} = \underline{\mathbf{k}} \quad \text{ή} \quad \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{10} \\ C_{20} \\ \vdots \\ C_{n0} \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

Καθορίζοντας τον πίνακα $\underline{\mathbf{R}}_i^T$ ως τη διαφορά των τυχαίων μεταβλητών δηλαδή $\underline{\mathbf{R}}_i^T = [Z_1 - m_1, \dots, Z_n - m_n]$, τότε ο εκτιμητής της Εξίσωσης 2.55 γράφεται σε μορφή πινάκων :

$$[Z_0 - m_0^*] = \underline{\lambda}^T \underline{\mathbf{R}}_i = \underline{\mathbf{k}}^T \underline{\mathbf{K}}^{-1} \underline{\mathbf{R}}_i \quad (2.62)$$

εφόσον $\underline{K} = \underline{K}^T$ (ο πίνακας \underline{K} είναι συμμετρικός) τότε και $\underline{K}^{-1} = (\underline{K}^{-1})^T$. Και το ελαχιστοποιημένο λάθος της διασποράς γράφεται :

$$\sigma_{SK}^2 = C_{00} - \underline{\lambda}^T \underline{k} = C_{00} - \underline{k}^T \underline{K}^{-1} \underline{k} \quad (2.63)$$

Συνθήκη ανεξαρτησίας

Αν υποθεθεί ότι οι n τυχαίες μεταβλητές Z_i , $i=1, \dots, n$, είναι ανεξάρτητες η μία από την άλλη, τότε θα πρέπει να καλούνται ανεξάρτητες μεταβλητές και η άγνωστη Z_0 να καλείται εξαρτημένη. Ο πίνακας \underline{K} των συντελεστών διασποράς των δεδομένων μετατρέπεται σε έναν διαγώνιο πίνακα:

$$\underline{K} = [C_{ij}] = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_{nn} \end{bmatrix}, \quad (2.64)$$

$$\text{όπου } C_{ij} = \begin{cases} 0, \text{ για } i \neq j \\ C_{ii}, \text{ για } i=j \end{cases}$$

Το Simple Kriging σύστημα της Εξίσωσης 2.59 γράφεται : $\lambda_i C_{ii} = C_{i0} \Rightarrow \lambda_i = C_{i0}/C_{ii}$,

όμως $\rho_{i0} = C_{i0} / \sqrt{C_{ii} C_{00}} \Rightarrow \lambda_i = \rho_{i0} \frac{\sqrt{C_{00}}}{\sqrt{C_{ii}}}$ και ο Simple Kriging εκτιμητής της

Εξίσωσης 2.55 γίνεται: $[Z_0 - m_0]^* = \sum_{i=1}^n \rho_{i0} \frac{\sqrt{C_{00}}}{\sqrt{C_{ii}}} \cdot [Z_i - m_i]$ ή

$$\left[\frac{Z_0 - m_0}{\sigma_0} \right]^* = \sum_{i=1}^n \rho_{i0} \cdot \left[\frac{Z_i - m_i}{\sigma_i} \right] \text{ αφού } \sigma_i = \sqrt{C_{ii}} .$$

Έτσι στην περίπτωση ανεξαρτησίας των δεδομένων, τα Simple Kriging βάρη λ_i δεν είναι άλλα από τους συντελεστές συσχέτισης ρ_{oi} ανάμεσα σε κάθε δεδομένο και στην άγνωστη εξαρτημένη μεταβλητή Z_0 . Όσο μεγαλύτερη η συσχέτιση ρ_{oi} ενός δεδομένου με τη Z_0 , τόσο μεγαλύτερο το βάρος του. Σημειώνεται ότι :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \rho_{i0} \neq 1 \\ \sigma_{SK}^2 = C_{00} \left[1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{C_{i0}}{C_{00}} \right] = C_{00} \left[1 - \sum_{i=1}^n \rho_{i0}^2 \right] \end{cases}$$

Επιπλέον, αν τα n δεδομένα είναι ανεξάρτητα και από την άγνωστη μεταβλητή Z_0 , δηλαδή $\rho_{i0}=0$, τότε και ο SK εκτιμητής ισούται με τη μέση τιμή $Z_0^* = m_0$.

Στην περίπτωση μας όπου τα n δεδομένα Z_i αντιστοιχούν στην ίδια συμπεριφορά Z αλλά σε διαφορετικές θέσεις $x_i \neq x_0$, ισχύει:

$$Z^*(x_0) - m = \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z(x_i) - m] \quad (2.65)$$

όπου m είναι η μέση τιμή των $(n+1)$ τυχαίων μεταβλητών $Z(x_0), Z(x_i), i=1, \dots, n$. Καθορίζοντας τη συνάρτηση διασποράς $C(h)$ ως τη συµμεταβλητότητα μεταξύ δύο οποιωνδήποτε τυχαίων μεταβλητών $Z(x), Z(x+h)$, που απέχουν απόσταση διανύσματος h :

$$C(h) = \text{Cov}\{Z(x), Z(x+h)\} \quad (2.66)$$

Το Simple Kriging σύστημα γράφεται :

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i - x_j) = C(x_i - x_0), \quad i=1, \dots, n \quad (2.67)$$

Όπως έγινε αντιληπτό από τα παραπάνω για την εφαρμογή της Simple Kriging θεωρείται δεδομένη η γνώση της μέσης τιμής m της παραμέτρου και η οποία μάλιστα σύμφωνα με τη συνθήκη της στασιμότητας είναι ίδια σε όλο το πεδίο μελέτης. Στην περίπτωση όμως που η μέση τιμή δεν είναι γνωστή τότε χρησιμοποιείται μια άλλη μέθοδος Kriging, η Ordinary Kriging. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν πολλές μέθοδοι Kriging ανάλογα με την περίπτωση του προβλήματος, όπως οι : Universal, Block, With Trend Model, With External Drift, Cokriging, Nonlinear, Indicator Probability, Soft Kriging. Δύο όμως είναι οι ευρείας χρήσης στα συνηθισμένα προβλήματα : η Simple Kriging και η Ordinary Kriging.

Στην περίπτωση τώρα που η μέση τιμή m είναι άγνωστη ο γραμμικός εκτιμητής $Z^*(x_0)$ γράφεται όπως και πριν $Z^*(x_0) = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$ και η μέση τιμή του λάθους είναι

$$E\{Z(x_0) - Z^*(x_0)\} = m - \lambda_0 - \sum_{i=1}^n \lambda_i m = -\lambda_0 + m \left(1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i\right), \text{ η οποία πρέπει να είναι}$$

μηδέν. Αυτό πραγματοποιείται όταν $\lambda_0=0$ και $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$.

Έτσι, ο αμερόληπτος γραμμικός εκτιμητής $Z(x_0)$ γράφεται :

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), \text{ με } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (2.68)$$

Το σφάλμα της διασποράς γράφεται :

$$\sigma_E^2 = \text{Var}\{Z(x_0) - Z^*(x_0)\} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n i_i i_j C(x_i - x_j) \quad (2.69)$$

$$\text{με } \begin{cases} i_0 = 1 \\ i_i = -\lambda_i, \quad i=1, \dots, n \\ C(x_i - x_j) = \text{Cov}\{Z(x_i) - Z(x_j)\} \end{cases}$$

Όμως, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί το λάθος της διασποράς για να διατηρηθεί η αμεροληψία, δηλαδή η συνθήκη $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$. Αυτό ισοδυναμεί σε βελτιστοποίηση κάτω από γραμμικούς περιορισμούς. Σε αυτό το σημείο θα γίνει χρήση της μεθόδου Lagrange, με τη δημιουργία της συνάρτησης S των $(n+1)$ παραμέτρων : i) των συντελεστών βάρους λ_i , $i=1, \dots, n$, και ii) της παραμέτρου Lagrange 2μ και καθορίζεται ως εξής :

$$S(\lambda_i, i=1, \dots, n; \mu) = \sigma_E^2 + 2\mu \left[\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right] \quad (2.70)$$

Η ελαχιστοποίηση της S πραγματοποιείται με τον μηδενισμό των $(n+1)$ μερικών παραγώγων της :

$$-\frac{1}{2} \frac{\partial S}{\partial \lambda_i} = \sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i - x_j) - 2\mu = 0, \quad i=1, \dots, n,$$

$$-\frac{1}{2} \frac{\partial S}{\partial \mu} = \sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 = 0$$

Οι πρώτες n εξισώσεις ξαναγράφονται :

$$C(x_i - x_0) - \sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i - x_j) - \mu = 0 \quad \text{ή} \quad C(x_i - x_0) = \sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i - x_j) + \mu \quad (2.71)$$

Τελικά, οι $(n+1)$ άγνωστοι λ_i , μ , υπολογίζονται από το $(n+1)$ γραμμικό σύστημα, το οποίο καλείται «Ordinary Kriging» σύστημα και είναι:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i - x_j) + \mu = C(x_i - x_0), & i=1, \dots, n, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (2.72)$$

το οποίο μπορεί να γραφτεί και σε όρους μεταβλητογράμματος μιας και αυτό είναι που χρησιμοποιείται στη γεωστατική και πιο συγκεκριμένα στην παρούσα εργασία :

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_i - x_0), & i=1, \dots, n, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (2.73)$$

και σε μορφή πινάκων θα έχουμε :

$$\begin{bmatrix} 0 & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & 0 & \gamma_{23} & \cdots & \gamma_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \gamma_{n3} & \cdots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \gamma_{20} \\ \vdots \\ \vdots \\ \gamma_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

Το ελαχιστοποιημένο λάθος της διασποράς το οποίο καλείται διασπορά Ordinary Kriging είναι :

$$\sigma_{OK}^2 = E\{[Z(x_0) - Z^*(x_0)]^2\} = C(0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i - x_0) - \mu \geq 0 \quad (2.75)$$

Συνθήκη ανεξαρτησίας

Εάν οι n τυχαίες μεταβλητές $Z(x_i)$ των δεδομένων είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, ο πίνακας $[C(x_i - x_j)]$ των συντελεστών διασποράς των δεδομένων μετατρέπεται σε έναν διαγώνιο πίνακα, με στοιχεία της κυρίας διαγωνίου την τυπική διασπορά $C(0) = \text{Var}\{Z(x)\}$. Το OK σύστημα της εξίσωσης 2.72 γίνεται:

$$\begin{cases} \lambda_i C(0) + \mu = C(x_i - x_0), & i=1, \dots, n, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (2.76)$$

ή

$$\begin{cases} \lambda_i = \frac{C(x_i - x_0)}{C(0)} - \frac{\mu}{C(0)} = \rho(x_i - x_0) - \frac{\mu}{C(0)} \\ -\mu = \frac{C(0)}{\mu} \left[1 - \sum_{i=1}^n \rho(x_i - x_0) \right] \end{cases}$$

οπότε :

$$\sigma_{OK}^2 = C(0) \cdot \left[1 - \sum_{i=1}^n \rho^2(x_i - x_0) \right] - \mu \left[1 - \sum_{i=1}^n \rho(x_i - x_0) \right] \geq 0$$

με $\rho(h) = C(h)/C(0) \in [-1, +1]$ να είναι διάγραμμα συσχέτισης (correlogram), το οποίο μετρά τη συσχέτιση μεταξύ δύο μεταβλητών $Z(x)$, $Z(x+h)$, που απέχουν απόσταση διανύσματος h .

Επιπλέον αν τα n δεδομένα είναι ανεξάρτητα και από την άγνωστη τυχαία μεταβλητή $Z(x_0)$ τότε $\rho(x_i - x_0) = 0$ και το OK σύστημα της εξίσωσης 2.72 γράφεται :

$$\begin{cases} \lambda_i = 1/n, & i=1, \dots, n, \\ -\mu = C(0)/n \end{cases} \quad (2.77)$$

Δηλαδή σε αυτήν την περίπτωση ο OK εκτιμητής γίνεται ίσος με τη μέση τιμή:

$$Z^*(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z(x_i) \text{ και } \sigma_{OK}^2 = C(0) + \frac{C(0)}{n} \geq 0$$

Κλείνοντας εδώ την παρουσίαση της μεθόδου Kriging πρέπει να σημειωθεί ότι τα Simple Kriging και Ordinary Kriging συστήματα των εξισώσεων 2.59 και 2.72 αντίστοιχα καλούνται στη βιβλιογραφία και στα υπολογιστικά μοντέλα ως «Best Linear Unbiased Estimator» ή BLUE, ένα ακρωνύμιο στο οποίο αναφέρονται τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου Kriging έναντι των άλλων μεθόδων χωρικής παρεμβολής (Journel, 1989).

3. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

3.1. Διαχείριση Υδατικών Πόρων

Η έννοια της διαχείρισης των υδατικών πόρων είναι ευρεία και έχει προσεγγισθεί και εξειδικευθεί τόσο από νομοθέτες όσο και από επιστήμονες ποικιλοτρόπως. Με την ευρεία της έννοια είναι το σύνολο των ενεργειών, διαδικασιών και έργων που γίνονται ώστε να ικανοποιηθούν στο μέγιστο βαθμό οι ανάγκες των χρηστών. Δηλαδή η προσφορά (διαθεσιμότητα) του νερού να καλύπτει τη ζήτηση, ή σε περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό η ζήτηση να προσαρμοστεί στην όποια δυνατή προσφορά.

Σύμφωνα με το άρθρο 10 του Νόμου 3199/2003 «Προστασία και διαχείριση των υδάτων - Εναρμόνιση με την Οδηγία 2000/60/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000» :

1. *Οι χρήσεις υδάτων διακρίνονται σε ύδρευση, άρδευση, βιομηχανική χρήση, ενεργειακή χρήση και χρήση για αναψυχή. Η χρήση για ύδρευση έχει προτεραιότητα, ως προς την ποσότητα και την ποιότητα, έναντι κάθε άλλης χρήσης.*
2. *Για κάθε χρήση εφαρμόζονται οι παρακάτω κανόνες, οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη στα Σχέδια Διαχείρισης: α) Κάθε χρήση πρέπει να αποβλέπει στη βιώσιμη και ισόρροπη ικανοποίηση των αναπτυξιακών αναγκών και να διασφαλίζει τη μακροπρόθεσμη προστασία των υδάτων, την επάρκεια των αποθεμάτων τους και τη διατήρηση της ποιότητάς τους, ιδιαίτερα δε τη μείωση και την αποτροπή της ρύπανσής τους. β) Η ικανοποίηση της ζήτησης του νερού γίνεται με βάση τα όρια και τις δυνατότητες των υδατικών αποθεμάτων, λαμβανομένων υπόψη των αναγκών για τη διατήρηση των οικοσυστημάτων, καθώς και της ισορροπίας που απαιτείται μεταξύ άντλησης κι ανατροφοδότησης των υπόγειων υδάτων. Οι ανάγκες των χρήσεων σε νερό ικανοποιούνται κατά το δυνατόν σε επίπεδο περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού. Κατά τη διαχείριση των υδάτων πρέπει να εξασφαλίζεται η εξοικονόμηση νερού μέσω της χρήσης τεχνικών μεθόδων, οικονομικών κινήτρων και εργαλείων.*

Εισάγεται εδώ η έννοια της «βιώσιμης διαχείρισης», η οποία είναι η βασική παράμετρος της «βιώσιμης ή αειφόρου ανάπτυξης», η διατύπωση της οποίας ανήκει στην Gro Harlem Brundtland την πρωθυπουργό της Νορβηγίας το 1987. Ο όρος αυτός είχε χρησιμοποιηθεί από τους εισηγητές της αγρο-οικολογίας την δεκαετία του '70 (διαχείριση δασών) και προϋπήρχε της Brundtland. Όμως η αίγλη και η διάδοσή του οφείλονται στην Έκθεση Brundtland (WCED, 1987) η οποία υποβλήθηκε το 1987 στην Παγκόσμια Επιτροπή για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη (WCED). Εκεί ο όρος περιγραφόταν ως *η ανάπτυξη που επιτρέπει την ικανοποίηση των σημερινών αναγκών χωρίς να συμβιβάζονται οι ανάγκες των μελλοντικών γενεών για ανάπτυξη*. Η συνθήκη του Μάαστριχτ του 1992 εισήγαγε τυπικά την έννοια της βιώσιμης ανάπτυξης στο δίκαιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αργότερα, το 1997, η Συνθήκη του Άμστερνταμ

ανήγαγε τη βιώσιμη ανάπτυξη σε έναν από τους πρωταρχικούς στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η νέα Συνθήκη ενίσχυσε σημαντικά την άποψη ότι η μελλοντική ανάπτυξη της Ευρωπαϊκής Ένωσης πρέπει να βασίζεται στην αρχή της βιώσιμης ανάπτυξης και στο υψηλό επίπεδο προστασίας του περιβάλλοντος. Έκτοτε έχουν προταθεί αναρίθμητοι ορισμοί τόσο του όρου της διαχείρισης των υδατικών πόρων όσο και της βιώσιμης διαχείρισης αυτών και έχει χυθεί πολύ μελάνι στην βιβλιογραφία.

Κατά τον Ξανθόπουλο (1996), η διαχείριση των υδατικών πόρων μπορεί να συνοψισθεί ως ένα *δυναμικό σύστημα δράσεων πέντε επιπέδων (θεσμικό, τεχνολογικό, οικονομικό, κοινωνικό, περιβαλλοντικό) μέσω του οποίου επιδιώκεται, συνήθως εμπειρικά, η κάλυψη των αναγκών σε νερό με το βέλτιστο αναπτυξιακό-οικονομικό, κοινωνικό και περιβαλλοντικό αποτέλεσμα.*

Ο Mays (1996), δίνει τον εξής ορισμό: η διαχείριση των υδατικών πόρων μπορεί να υποδιαιρεθεί σε τρεις γενικές κατηγορίες:

- Διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων για κάλυψη αναγκών
- Διαχείριση σε καταστάσεις υπερβολής (κατάχρησης, έλλειψης, έκτατης ανάγκης)
- Περιβαλλοντική αποκατάσταση

Ο Δημόπουλος (1998) δίνει τον εξής ορισμό: *Με τον όρο διαχείριση υδατικών πόρων ή του υδατικού δυναμικού μια περιοχής, εννοούμε όλες εκείνες τις ενέργειες που αποσκοπούν στην ορθολογική τους εκμετάλλευση με ιεραρχημένη κατανομή στο χώρο και διανομή στο φορέα χρήση, στα φυσικά όρια των φυσικών διακυμάνσεων τους με συνδυασμό έργων και επεμβάσεων και με το ελάχιστο οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος.*

Σύμφωνα με τον Καλλέργη (2001), η έννοια της διαχείρισης συνοδεύεται από επιθετικούς προσδιορισμούς, όπως:

- Ορθολογική διαχείριση που σημαίνει διαχείριση του μέτρου, λογική χρήση νερού και προστασία περιβάλλοντος
- Βέλτιστη διαχείριση, είναι αυτή που επιδιώκει το καλύτερο αναπτυξιακό-οικονομικό αποτέλεσμα με τη μικρότερη δυνατή δαπάνη
- Αειφόρος ή βιώσιμη είναι αυτή που έχει κυρίως περιβαλλοντική διάσταση, που χρησιμοποιεί τόσο ποσότητα νερού ώστε αυτή να διατίθεται εσαεί και φυσικά να μην υπάρχουν αναπόδραστες και μη αναστρέψιμες περιβαλλοντικές συνέπειες.

Ο Γκανούλης (2002), σύμφωνα με την Έκθεση Brundtland δίνει τον εξής ορισμό: *είναι αυτή που διασφαλίζει τις τρέχουσες ανάγκες χωρίς να θέτει σε κίνδυνο τη δυνατότητα μελλοντικών γενιών να εξυπηρετήσουν τις δικές τους και συμπληρώνει ότι για τους υδατικούς πόρους βιώσιμη διαχείριση μπορεί να ειπωθεί πως είναι αυτή που χρησιμοποιεί το νερό για διάφορες χρήσεις διατηρώντας ταυτόχρονα την υδρολογική, ποιοτική και οικολογική του οντότητα.*

Κατά τον Τσακίρη (2004), *βιώσιμη διαχείριση υδατικών πόρων είναι η συστηματική χωρο-χρονική παρακολούθηση και πρόβλεψη δύο χωροχρονικών, πολυδιάστατων παραμέτρων της διαθεσιμότητας των υδατικών πόρων και της ζήτησης καθώς και οι αποφάσεις για τα δομικά και μη μέτρα με στόχο την κάλυψη των αναγκών σε νερό και την προστασία των υδατικών πόρων και του περιβάλλοντος κατά τον ευνοϊκότερο τρόπο τώρα και στο μέλλον.*

Σύμφωνα με τον Μυλόπουλο (2000) οι τέσσερις θεμελιώδεις αρχές για την ορθολογική διαχείριση και προστασία των Υδατικών Πόρων είναι οι εξής:

- Ενιαία και ολοκληρωμένη αντιμετώπιση των τεχνικών, οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων της διαχείρισης των υδατικών πόρων. Η προσέγγιση αυτή, προσανατολισμένη προς την κατεύθυνση της ολιστικής θεώρησης των περιβαλλοντικών συστημάτων, έρχεται να αντικαταστήσει την παραδοσιακή και αναποτελεσματική πολιτική της τομεακής και αποσπασματικής διαχείρισης του νερού. Αστικές, αγροτικές, βιομηχανικές, ενεργειακές, τουριστικές και λοιπές δραστηριότητες και χρήσεις του νερού αντιμετωπίζονται ενιαία εντός των φυσικών ορίων της υδρολογικής λεκάνης και του υδατικού διαμερίσματος. Συγχρόνως, με την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών συστημάτων, δεν υφίσταται πλέον η αναχρονιστική, όσο και τεχνητή διαφοροποίηση και ανεξάρτητη θεώρηση των ποσοτικών από τις ποιοτικές παραμέτρους.
- Διαχείριση της ζήτησης, αντί της ζημιογόνου περιβαλλοντικά, αλλά και αδιέξοδης οικονομικά πολιτικής της διαχείρισης της προσφοράς του νερού. Η λογική της εγκατάλειψης των πηγών του νερού κάθε φορά που αυτές εξαντλούνται ή υποβαθμίζονται και η διαρκής αναζήτηση νέων υδατικών πόρων αντικαθίσταται από την οικονομικά αποδοτικότερη και συγχρόνως περισσότερο ήπια ως προς το περιβάλλον πολιτική της διαχείρισης της ζήτησης του νερού, η οποία όπως λέγεται, αποτελεί την πιο φθηνή εναλλακτική λύση για την ικανοποίηση των υδατικών αναγκών.
- Οικονομική θεώρηση του νερού και κοστολόγησή του με βάση την πραγματική του αξία, η οποία αντικατοπτρίζει την αξία της πολύτιμης εναλλακτικής ή και δυνητικής του ακόμη χρήσης. Η αδυναμία εφαρμογής αυτής της αρχής έχει ως επακόλουθο να αντιμετωπίζεται το νερό είτε ως κοινωνικό αγαθό που πρέπει να παρέχεται δωρεάν, είτε ως χαμηλής αξίας ανανεώσιμος φυσικός πόρος και κατά συνέπεια οδηγούμαστε σε αναποτελεσματικότητα, καθώς και σε σπάταλη και καταστροφική περιβαλλοντικά διαχείριση του νερού.
- Αποκεντρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων με την ένταξη και συμμετοχή στην διαδικασία των τελικών χρηστών του νερού, όλων των συναρμόδιων και άμεσα ενδιαφερόμενων τοπικών και κοινωνικών φορέων, καθώς και την ανάμειξη και εμπλοκή του ιδιωτικού τομέα. Το παραδοσιακό, συγκεντρωτικό, διαρθρωμένο σε τομείς ανάλογα με τη χρήση του νερού, διοικητικό σύστημα διαχείρισης, αντικαθίσταται πλέον από ένα σύγχρονο, αποκεντρωμένο και βασισμένο στη συμμετοχική προσέγγιση σύστημα. Η διαχείριση του νερού θα

πρέπει να γίνεται στο κατώτατο δυνατό διοικητικό επίπεδο, σε άμεση συσχέτιση με τη διαχείριση και την επέκταση των χρήσεων/καλύψεων γης.

Η αναλυτική παρουσίαση της παραπάνω βιβλιογραφίας σκοπό δεν έχει να κουράσει τον αναγνώστη, αλλά την επεξήγηση των παραπάνω εννοιών μιας και σε αυτές στηρίζεται η εν λόγω έρευνα καθώς και την εξειδίκευσή τους και τον εμπλουτισμό τους με την πάροδο του χρόνου, που οφείλεται στην ιδιαίτερη μέριμνα που έδειξαν και δείχνουν οι επιστήμονες. Αξίζει να σημειωθεί πως από την εμπειρική επίτευξη της διαχείρισης των υδατικών πόρων σύμφωνα με τον Ξανθόπουλο (1996) φτάσαμε στη συστηματική χωρο-χρονική παρακολούθηση και πρόβλεψη του Τσακίρη (2004). Από τους υδατικούς πόρους ή το υδατικό δυναμικό μια περιοχής του Δημόπουλου (1998), φτάσαμε στην ολοκληρωμένη διαχείριση σε επίπεδο λεκάνης απορροής του Μυλόπουλου (2000). Όλος αυτός ο εμπλουτισμός καινοτόμων και εξειδικευμένων γνώσεων οφείλεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό στους επιστήμονες και ερευνητές, οι οποίοι με γνώμονα τις παραπάνω αρχές προτείνουν εργαλεία και μεθοδολογίες για την εφαρμογή αυτών σε πραγματικά προβλήματα.

Ένα τέτοιο εργαλείο προτείνεται και στην εν λόγω έρευνα, το οποίο υπακούει και εφαρμόζει τις αξίες της διαχείρισης ως εξής:

- Ολοκληρωμένη διαχείριση: Παρόλο που εξετάζεται ο υπόγειος υδροφορέας της λίμνης Κάρλας, ένα σύστημα υδρολογικών μοντέλων εκτελείται σε επίπεδο λεκάνης απορροής ώστε να προσομοιώσει κάθε υδατικός πόρο της λεκάνης της Κάρλας
- Βιώσιμη ή αειφόρος διαχείριση: Η στρατηγική διαχείρισης που προτείνεται για τον υποβαθμισμένο υδροφορέα δεν αποσκοπεί μόνο στη μη εκμετάλλευση των μη ανανεώσιμων αποθεμάτων του, αλλά και στην ανάταξη του με μελλοντικό στόχο την επαναφορά του σε πρότερη κατάσταση.
- Βέλτιστη διαχείριση: επιδιώκεται το καλύτερο αναπτυξιακό-οικονομικό αποτέλεσμα με τη μικρότερη δυνατή δαπάνη, μιας και το πρόβλημα της βελτιστοποίησης αποσκοπεί στο μεγαλύτερο κέρδος του διαχειριστή από την πώληση του νερού στους χρήστες.

3.2. Βελτιστοποίηση

Η βελτιστοποίηση είναι μια μέθοδος ανάλυσης συστημάτων και βασικό εργαλείο της διαχείρισης των υδατικών πόρων. Ως ανάλυση συστημάτων καλείται η επιστημονική μέθοδος με τη χρήση της οποίας γίνεται η επιλογή, ανάμεσα από ένα σημαντικό αριθμό εναλλακτικών δυνατών λύσεων, του συνδυασμού εκείνου, των ενεργειών, με τον οποίο θα επιτευχθούν, με το καλύτερο δυνατό τρόπο, οι αντικειμενικοί στόχοι, υπό το σύνολο νομικών, οικονομικών και κοινωνικών περιορισμών (Hall and Dracup, 1970 και Τολίκας, 1987). Με τον όρο σύστημα περιγράφεται ένα μηχανισμός, που δέχεται σύνολο «εισερχομένων» και αφού υποστούν επεξεργασία και διαμόρφωση αποδίδονται με τη μορφή ενός συνόλου «εξερχομένων».

Η βελτιστοποίηση στοχεύει στην αναζήτηση της βέλτιστης δυνατής λύσης ενός προβλήματος μέσα από ένα σύνολο άπειρων θεωρητικών λύσεων. Η λύση αυτή προσδιορίζεται από μια συγκεκριμένη αντικειμενική συνάρτηση, ενώ επιπλέον πρέπει να ικανοποιεί ένα σύνολο περιορισμών. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης αποτελούνται από τρία βασικά στοιχεία:

- Την αντικειμενική συνάρτηση, που αποτελεί τη μαθηματική σχέση, η οποία προσδιορίζει τη βέλτιστη δυνατή πολιτική. Δηλαδή για να μεγιστοποιηθούν τα επιθυμητά «εξερχόμενα» και να ελαχιστοποιηθούν τα ανεπιθύμητα. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης μπορεί να θέτει ως στόχο τόσο τη μεγιστοποίηση όσο και την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης:

$$\text{maximize (or minimize) } F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3.1)$$

$$\text{όπου } \text{maximize } F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = - \text{minimize } (-F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n))$$

- Τις μεταβλητές απόφασης ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$), οι οποίες είναι τα ελεγχόμενα «εισερχόμενα» δεδομένα του συστήματος. Με άλλα λόγια είναι οι παράμετροι που καθορίζουν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και αποτελούν τη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης με τη μορφή πλέον του συνόλου των «εξερχομένων».
- Τους περιορισμούς, που είναι οι συνθήκες οι οποίες καθορίζουν τα αποδεκτά όρια διακύμανσης των τιμών των μεταβλητών και τις συνθήκες που συνδέουν τις μεταβλητές μεταξύ τους, ως εξής:

$$u_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq a_1$$

$$u_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq a_2$$

.

$$u_m(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq a_m \quad (3.2)$$

όπου a_1, a_2, a_m γνωστές τιμές.

Ως δυνατή λύση του προβλήματος καλείται το διάνυσμα (σύνολο) των μεταβλητών που ικανοποιούν τους περιορισμούς. Ο χώρος δυνατής πολιτικής αποτελείται από τις παραπάνω δυνατές λύσεις. Ως βέλτιστη λύση του συστήματος θεωρείται το διάνυσμα (σύνολο) εκείνων των δυνατών λύσεων που ικανοποιούν ταυτόχρονα και την αντικειμενική συνάρτηση.

Σε σχέση με τη φύση και τη μορφή των μεταβλητών απόφασης, και τον τρόπο με τον οποίο εμπλέκονται στους περιορισμούς και την αντικειμενική συνάρτηση, ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης μπορεί ταξινομηθεί σε διάφορες κατηγορίες.

Φύση των μεταβλητών απόφασης:

Καθοριστικός (ντετερμινιστικός) ή στοχαστικός: Όταν οι τιμές των μεταβλητών απόφασης είναι συγκεκριμένες, τότε ο αλγόριθμος λέγεται ντετερμινιστικός. Στην

περίπτωση που οι τιμές των μεταβλητών αντιμετωπίζονται με πιθανολογική θεώρηση, ο αλγόριθμος λέγεται στοχαστικός.

Συνεχής ή ακέραιος: Όταν οι μεταβλητές απόφασης παίρνουν συνεχείς τιμές, τότε ο αλγόριθμος λέγεται συνεχής. Στην περίπτωση όμως που οι μεταβλητές παίρνουν διακεκριμένα μόνο ακέραιες τιμές τότε ο αλγόριθμος λέγεται ακέραιος.

Περιορισμός και φύση αντικειμενικής συνάρτησης:

Γραμμικός ή μη γραμμικός: Η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί του προβλήματος είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης. Όταν, είτε η αντικειμενική συνάρτηση είτε κάποιος από τους περιορισμούς, δεν είναι γραμμική συνάρτηση όλων των μεταβλητών απόφασης τότε το μοντέλο βελτιστοποίησης δεν είναι γραμμικό. Στην ειδική περίπτωση που η αντικειμενική συνάρτηση είναι εξίσωση δευτέρου βαθμού και οι περιορισμοί είναι γραμμικοί, το μοντέλο βελτιστοποίησης λέγεται τετραγωνικό.

Στατικός ή δυναμικός: Οι αλγόριθμοι που δε λαμβάνουν υπ' όψη τους τη διάσταση του χρόνου, λέγονται στατικοί, ενώ εκείνοι, των οποίων οι συναρτήσεις λαμβάνουν υπ' όψη τους τις χρονικές μεταβολές των μεταβλητών απόφασης, λέγονται δυναμικοί.

3.2.1. Γραμμικός Προγραμματισμός

Στο γραμμικό προγραμματισμό τόσο η αντικειμενική συνάρτηση όσο και οι περιορισμοί του είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης. Η αντικειμενική του συνάρτηση είναι:

$$\text{Max (or min)} \quad x_0 = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (3.3)$$

με περιορισμούς

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, \quad \text{για } i=1,2,\dots,m$$

$$x_j > 0, \quad \text{για } j=1,2,\dots,n \quad (3.4)$$

όπου c_j , a_{ij} και b_i είναι σταθεροί συντελεστές. Με τη βοήθεια μητρών, ένα γραμμικό πρόβλημα μπορεί να γραφεί συνοπτικά ως εξής:

Να βρεθεί το διάνυσμα x , για το οποίο ισχύει

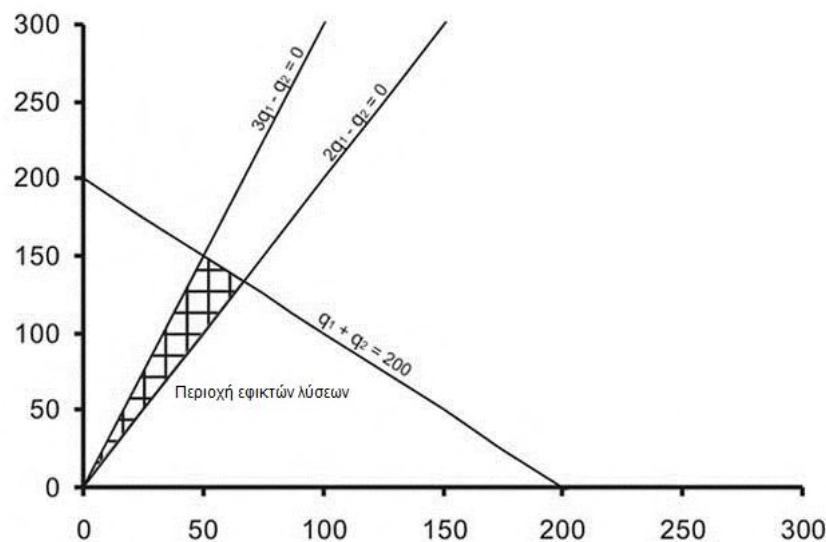
$$\text{Max (or min)} \quad x_0 = c^T x \quad (3.5)$$

με περιορισμούς

$$Ax \leq b \text{ και } x \geq 0 \quad (3.6)$$

όπου A , η μήτρα των συντελεστών (a_{ij}) διαστάσεων $m \times n$ και b, c, x διανύσματα – μήτρες αντίστοιχων διαστάσεων $m \times 1$, $n \times 1$, $n \times 1$ και c^T η ανάστροφη μήτρα της c . Ένα τέτοιο γραμμικό πρόβλημα είναι διαστάσεων $m \times n$.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_m \end{bmatrix}$$



Σχήμα 3. 1. Γραφική επίλυση ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού.

Η πιο επιτυχής μέθοδος επίλυσης ενός γραμμικού προβλήματος είναι η μέθοδος Simplex, η οποία θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Για την ορθή διατύπωση ενός γραμμικού προγραμματισμού πρέπει να ισχύουν οι κάτωθι προϋποθέσεις:

- **Γραμμικότητα:** Όλες οι συναρτήσεις του προβλήματος (αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμοί) πρέπει να είναι γραμμικές ως προς τις άγνωστες μεταβλητές. Η προϋπόθεση της γραμμικότητας είναι η πιο σημαντική και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Υπάρχουν βέβαια και οι περιπτώσεις προβλημάτων, όπου οι σχέσεις είναι «Τμηματικά Γραμμικές» (Piecewise Linear - Bruner, 1980). Σε αυτές τις περιπτώσεις και σε προβλήματα ήπιας μη γραμμικότητας μπορεί να επιτευχθεί αρκετά καλή προσέγγιση με γραμμικές συναρτήσεις.
- **Διαιρετότητα:** Κάθε μεταβλητή πρέπει να είναι συνεχής και επομένως άπειρα διαιρετή. Αυτό βέβαια σημαίνει πως υπάρχει περίπτωση όλες οι μεταβλητές να παίρνουν ακέραιες τιμές, οπότε το πρόβλημα εμπίπτει στην κατηγορία του «Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού», ενώ σε περίπτωση που κάποιες από αυτές είναι ακέραιες και κάποιες συνεχής μιλάμε για «Μικτό Γραμμικό Προγραμματισμό».
- **Βεβαιότητα:** Όλες οι παράμετροι του προβλήματος είναι γνωστές με βεβαιότητα. Στην αντίθετη περίπτωση ο προγραμματισμός καλείται «Στοχαστικός» και οι παράμετροι ακολουθούν γνωστούς στατιστικούς νόμους.

Όταν η πληροφορία για κάποιους συντελεστές είναι προσεγγιστική, υπάρχουν δηλαδή διαστήματα στα οποία ανήκουν ασαφώς αυτοί, τότε ο προγραμματισμός καλείται «Ασαφής».

- Αριθμός Διαστάσεων: Αφορά το πλήθος των αντικειμενικών συναρτήσεων του προβλήματος απόφασης. Η αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να είναι μία και μοναδική, διότι στην αντίθετη περίπτωση το πρόβλημα εμπίπτει στην κατηγορία του «Πολυκριτηριακού Προγραμματισμού».

3.2.2. Μη Γραμμικός Προγραμματισμός

Στο μη γραμμικό προγραμματισμό, είτε η αντικειμενική συνάρτηση είτε κάποιοι από τους περιορισμούς δεν είναι γραμμικές συναρτήσεις όλων των μεταβλητών απόφασης. Οι λόγοι που καθιστούν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μη γραμμικό είναι οι εξής:

- Οι σχέσεις που συνδέουν τις μεταβλητές είναι εμπειρικές, προερχόμενες μόνο από παρατηρήσεις ή μετρήσεις, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν αναλογικές μεταβολές, π.χ. σε κόστη, αποδόσεις συστημάτων και διάφορα άλλα χαρακτηριστικά.
- Οι δομικές σχέσεις, που ορίζουν φυσικά φαινόμενα, περιγράφουν με μαθηματικό τρόπο τις διαδικασίες και προσδιορίζουν τους κανόνες διαχείρισης δεν είναι πάντα γραμμικές.

Οι γενικές εξισώσεις που τον περιγράφουν είναι οι κάτωθι:

$$\text{minimize } F(x) + c^T x + d^T y \quad (3.7)$$

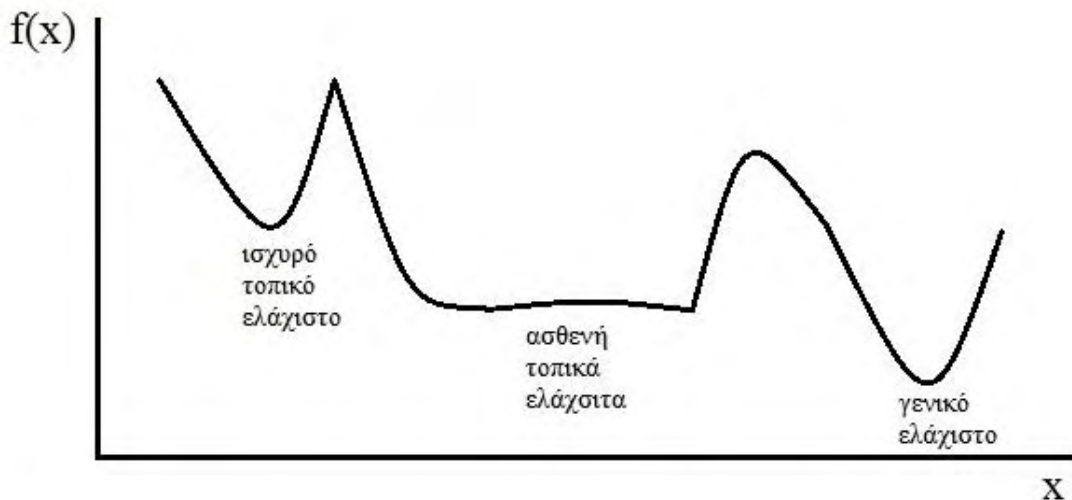
με

$$v_1 \leq f(x) + A_1 y \leq u_1 \quad (3.8)$$

$$v_2 \leq A_2 x + A_3 y \leq u_2 \quad (3.9)$$

όπου τα διανύσματα c , d , v_1, v_2 , u_1 , u_2 και οι πίνακες A_1 , A_2 , A_3 είναι σταθερά, η $F(x)$ είναι μια ομαλή συνάρτηση και η $f(x)$ ένα διάνυσμα ομαλών συναρτήσεων. Τα n_1 στοιχεία του x ονομάζονται μη γραμμικές μεταβλητές, και τα n_2 του y γραμμικές μεταβλητές. Αντίστοιχα οι m_1 εξισώσεις 3.8 ονομάζονται μη γραμμικοί περιορισμοί και οι m_2 εξισώσεις 3.9 γραμμικοί περιορισμοί. Στο μη γραμμικό προγραμματισμό δεν εξασφαλίζεται πάντα η εύρεση γενικού ακρότατου (μέγιστου ή ελάχιστου), αλλά μόνο η εύρεση ενός τοπικού ακρότατου. Από τη διακύμανση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης στην περίπτωση έστω της μία μόνο μεταβλητής, φαίνεται ότι ο χαρακτηρισμός ενός σημείου ως βέλτιστου εξαρτάται από τη σχέση του με την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στα γειτονικά του σημεία (Σχήμα 3.2). Για την επιτυχή αναζήτηση του γενικού ακρότατου απαιτείται πολύ καλή γνώση του φαινομένου, ώστε να γνωρίζει κανείς τη γειτονιά του ακρότατου αυτού και να την ορίσει σαν σημείο

εκκίνησης για την αναζήτηση του γενικού ακρότατου. Το πλήθος των τοπικών ακρότατων είναι ανάλογο του βαθμού μη γραμμικότητας του προβλήματος. Έτσι σε ένα έντονα μη γραμμικό πρόβλημα, ο εντοπισμός του γενικού ακρότατου γίνεται ακόμα πιο δύσκολος.



Σχήμα 3. 2. Παράδειγμα ελαχίστων μια συνάρτησης μεταβλητής

Ένας συνήθης τρόπος επίλυσης των μη γραμμικών προβλημάτων, ο οποίος έχει εφαρμοστεί και σε προβλήματα διαχείρισης υπόγειων υδατικών πόρων, είναι η σχηματοποίηση τους ως πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, στηριζόμενες σε απλουστεύσεις. Η μέθοδος αυτή, η οποία καλείται **Διαδοχικός Γραμμικός Προγραμματισμός** (Successive Linear Programming), αρχικά αναπτύχθηκε από τους Stewart και Griffith (1961) και έπειτα αναλύθηκε επιπλέον με τη μεθοδολογία που τη διέπει σήμερα από τους Palacios-Gomez et al. (1982). Χρησιμοποιείται από το μοντέλο διαχείρισης στην εν λόγω έρευνα. Εγκυμονεί κινδύνους σε περιπτώσεις σύνθετων προβλημάτων και απαιτεί καλή γνώση του προβλήματος. Έχει ιδιαίτερη απήχηση στην περίπτωση των μεγάλων αραιών ή ήπιων μη γραμμικών προβλημάτων. Σε τέτοια προβλήματα κάποιες από τις μεταβλητές στην αντικειμενική συνάρτηση ή/και στου περιορισμούς είναι μη γραμμικές. Έστω λοιπόν ένα μη γραμμικό πρόβλημα, όπως αυτό που διατυπώθηκε παραπάνω:

$$\text{minimize } h(x, y) = g_0(x) + a_0(y) \quad (3.10)$$

με

$$g(x) + A_1 y = b_1 \quad (m_1 \text{ γραμμές}) \quad (3.11)$$

$$A_2 x + A_3 y = b_3 \quad (m_2 \text{ γραμμές}) \quad (3.12)$$

$$l_1 < x < u_1, \quad l_2 < y < u_2$$

Οι n_1 μη γραμμικές μεταβλητές x μπορεί να εμπεριέχονται στην αντικειμενική συνάρτηση, μέσω της μη γραμμικής συνάρτησης $g_0(x)$ ή στους πρώτους m_1 περιορισμούς μέσω του διανύσματος των συναρτήσεων $g(x)=(g_1(x),\dots,g_{m_1}(x))$. Το n_2 διαστάσεων διάνυσμα y περιέχει τις γραμμικές μεταβλητές και οι τελευταίοι m_2 πειρασμοί είναι επίσης γραμμικοί. Κάθε μη γραμμικό πρόγραμμα μπορεί να εκφραστεί σε τέτοια μορφή (πιθανόν με $m_2=0$), διαλέγοντας το y να περιέχει τις χαλαρές ή λογικές μεταβλητές. Υποτίθεται πως όλες οι μη γραμμικές συναρτήσεις g_0,\dots,g_{m_1} είναι παραγωγίσιμες παντού. Αυτές οι συναρτήσεις απαιτείται να διαχωριστούν. Λαμβάνοντας υπόψη ένα βασικό σημείο \bar{x} , κάθε συνάρτηση g_i προσεγγίζεται από δικές της Taylor σειρές γραμμικοποίησης του \bar{x} . Η Ιακωβιανή μήτρα της $g(x)$, καθορίζεται ως εξής:

$$J(x) = (\partial g_i / \partial x_j) \quad (3.13)$$

στην οποία αντικαθίστανται η $g(x)$ με $g(\bar{x}) + J(\bar{x})d$ και η $g_0(x)$ με $g_0(\bar{x}) + J(\bar{x})d$, όπου $d = x - \bar{x}$. Η γραμμικοποίηση αυτή είναι ακριβής για μικρές τιμές της d , με όρια:

$$-s \leq d \leq s \quad (3.14)$$

όπου s είναι ένα n_1 διαστάσεων διάνυσμα με όλες τις συνιστώσες θετικές. Το s καλείται το βήμα ορίων. Το διάδοχο σημείο $\bar{x} + d$, πρέπει και αυτό να ικανοποιεί τον περιορισμό:

$$l_1 < \bar{x} + d < u_1 \quad (3.15)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.14) και (3.15) με τις Taylor σειρές και αντικαθιστώντας το x με $x = \bar{x} + d$, δημιουργείται το γραμμικό πρόβλημα $LP(\bar{x}, s)$, όπου:

$$\text{minimize } \nabla g_0(\bar{x})d + a_0 y \quad (3.16)$$

με περιορισμούς:

$$J(\bar{x})d + A_1 y = b_1 - g(\bar{x}) \quad (3.17)$$

$$A_2 d + A_3 y = b_2 - A_2(\bar{x}) \quad (3.18)$$

$$\max(l_1 - \bar{x}, -s) \leq d \leq \min(u_1 - \bar{x}, s) \quad l_2 \leq y \leq u_2$$

Στο Διαδοχικό Γραμμικό Προγραμματισμό επιλύεται η $LP(\bar{x}, s)$ (προσωρινά υποτίθεται πως είναι εφικτή), αποδίδοντας μια λύση (\bar{d}, \bar{y}) . Αν το υποψήφιο διάδοχο σημείο $(\bar{x} + d, \bar{y})$ ικανοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια, είναι αποδεκτό, και το βήμα ορίων s μπορεί να αυξηθεί. Αλλιώς, το s μειώνεται σε s' και η $LP(\bar{x}, s)$ επιλύεται.

Η βιβλιογραφία έχει να επιδείξει ένα μεγάλο αριθμό μεθόδων στην επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων, όπως η μέθοδος Rosenbrock, η μέθοδος Fletcher - Powell, η

μέθοδος Rosen, η μέθοδος Lagrange, η μέθοδος μειωμένης κλίσης (reduced gradient), η μέθοδος Newton και άλλες (Davidon, 1959; Wolfe, 1962; Fletcher, 1972; Robinson, 1972; Rosen and Kreuser, 1972; Gill et al., 1980; Gill et al., 1981). Σε όλες τις μεθόδους επίλυσης μοντέλων μη γραμμικού προγραμματισμού ο υπολογισμός της βέλτιστης λύσης, επιτυγχάνεται μέσω έρευνας σε κατάλληλα σημεία του χώρου δυνατής πολιτικής.

3.2.3. Η βελτιστοποίηση στη διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων

Η βέλτιστη χρήση των φυσικών πόρων του πλανήτη μας έχει αναχθεί τα τελευταία χρόνια σε παγκόσμιο ζήτημα μεγάλης προτεραιότητας, λόγω της αύξησης του πληθυσμού. Η ζήτηση του νερού ολοένα αυξάνεται από όλους του χρήστες παγκοσμίως (γεωργία, ύδρευση, βιομηχανία κ.α.) και εφόσον τα διαθέσιμα αποθέματα είναι συγκεκριμένα, πολλές φορές η κατανάλωση του νερού από τον ένα χρήστη γίνεται εις βάρος των άλλων. Τα υπόγεια υδατικά συστήματα ήταν από τα αρχαία χρόνια πηγή τροφοδότησης καθαρού νερού για τις ανάγκες και δραστηριότητες του ανθρώπου (Gorokhovich et al. 2011; Mays 2011). Η εκμετάλλευση του υπόγειου ύδατος σε πολλές χώρες του κόσμου, όπως και στην Ελλάδα, δεν γίνεται υπό από το πρίσμα της βιώσιμης διαχείρισης, με συνέπεια τα σημαντικά προβλήματα που προκύπτουν τόσο στην ποσότητα, όσο και στην ποιότητα αυτού. Είναι η φύση της ανανέωσης του υπόγειου ύδατος που το καθιστά ιδιαίτερα ευάλωτο και αυτός είναι ένας λόγος παραπάνω για τη βέλτιστη εκμετάλλευση του. Τα επιφανειακά ύδατα ανανεώνονται μέσω του υδρολογικού κύκλου του νερού με ένα μέσο χρονικό διάστημα που ποικίλει από 16 μέρες (ποτάμια) σε 17 χρόνια (λίμνες και ταμιευτήρες), ενώ ο αντίστοιχος μέσος χρόνος για τα υπόγεια ύδατα είναι 1400 χρόνια (Shiklomanov and Rodda, 2003).

Σε τοπικό επίπεδο, η ανάγκη αυτή της βέλτιστης χρήσης του νερού και δει του υπογείου είναι ακόμη πιο σημαντική μιας και ήδη στη Θεσσαλία η «ελλειμματική» άρδευση καταναλώνει το 93% (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας, 2013) του προς διάθεση υπόγειου ύδατος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η λεκάνη απορροής της Κάρλας, όπου για να καλυφθούν οι ανάγκες ύδρευσης της πόλης του Βόλου πρέπει να κλείσει ένας σημαντικός αριθμός ιδιωτικών αρδευτικών γεωτρήσεων, οι ανάγκες των οποίων θα καλυφθούν από το επιφανειακό νερό του προς ανασύσταση ταμιευτήρα. Μέχρι όμως να λειτουργήσει ο ταμιευτήρας κάτι τέτοιο είναι απαγορευτικό, μιας και ήδη εδώ και πολλά χρόνια ο υπόγειος υδροφορέας βρίσκεται υπό καθεστώς υπερεκμετάλλευσης. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει τη μεγάλη ανταγωνιστικότητα που υπάρχει ανάμεσα στους χρήστες.

Γίνεται λοιπόν σαφές πως η βέλτιστη χρήση του υπόγειου ύδατος στη λεκάνη της Κάρλας χρήζει άμεσης προτεραιότητας ιδιαίτερα τώρα που αναμένεται η λειτουργία του ταμιευτήρα. Χρήσιμο επιστημονικό εργαλείο για αυτό το σκοπό, έχει πλειστάκις αποδειχθεί η βελτιστοποίηση, η οποία μέσω του γραμμικού ή μη προγραμματισμού της έχει εφαρμοσθεί σε πραγματικά προβλήματα διαχείρισης μεγάλης κλίμακας υπόγειων υδατικών συστημάτων. Το πιο σημαντικό της πλεονέκτημα είναι η εύρεση, με απλό τρόπο, της βέλτιστης λύσης υπό προϋποθέσεις που ορίζει ο διαχειριστής. Τόσο οι περιορισμοί, όσο και οι μεταβλητές απόφασης μπορούν ακόμη και στα προβλήματα της

υπόγειας ροής να είναι όροι οικονομικοί, κοινωνικοί κ.α. γεγονός στο οποίο οφείλεται η ευρεία χρήση της.

Ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία θα βρει κάποιος πλήθος θεωρητικών και πρακτικών εφαρμογών της βελτιστοποίησης σε προβλήματα ποσότητας και ποιότητας υπόγειων υδατικών συστημάτων. Εργασίες, οι οποίες αναφέρονται σε αυτό το θέμα είναι του Gorelick (1983), Willis και Yeh (1987), Ahlfeld και Heidari (1994), Das και Datta (2001) και Sinhg (2012).

Ιδιαίτερη όμως μνεία θα δοθεί παρακάτω σε προηγούμενες εργασίες που αφορούν προβλήματα βελτιστοποίησης με τα εξής χαρακτηριστικά: i) συμμετοχή οικονομικών όρων στην αντικειμενική συνάρτηση, ii) εργασίες σε εθνικό επίπεδο και iv) χρήση του διαδοχικού γραμμικού προγραμματισμού, μιας και τα ίδια χαρακτηριστικά είναι αυτά που περιέχονται στη μεθοδολογία βελτιστοποίησης της εν λόγω έρευνας.

Η συμμετοχή οικονομικών κριτηρίων στην αντικειμενική συνάρτηση αποτελεί ένα από τα πλεονεκτήματα της βελτιστοποίησης δίνοντας τη δυνατότητα στο διαχειριστή να αποτιμά με οικονομικούς όρους τη κάθε βέλτιστη στρατηγική πολιτική καταλήγοντας έπειτα αυτός σε αυτή που θεωρεί καταλληλότερη. Εδώ άλλωστε βρίσκεται και η πραγματική συνεισφορά της βελτιστοποίησης στην ανάλυση λήψης αποφάσεων. Ο Gorelick et. al., (1983) είχε κατατάξει τα διαχειριστικά μοντέλα που εμπεριέχουν οικονομικούς όρους στα προβλήματα βελτιστοποίησης, στα μοντέλα κατανομής και εκτίμησης της πολιτικής διαχείρισης των υπόγειων υδάτων, τα οποία τα διαχώριζε από τα διαχειριστικά μοντέλα που δεν περιέχουν οικονομικούς όρους και τα οποία τα χαρακτήριζε ως διαχειριστικά μοντέλα υπόγειας υδραυλικής. Προχώρησε και σε περαιτέρω κατηγοριοποίηση αυτών όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3. 3. Κατηγοριοποίηση διαχειριστικών μοντέλων υπόγειων υδάτων σύμφωνα με τον Gorelick (1983).

Οι Lee και Aronafsky (1958) ήταν οι πρώτοι που εφάρμοσαν μεθόδους βελτιστοποίησης με οικονομικούς όρους, σε προβλήματα υπόγειας ροής με τη διαφορά πως το ενδιαφέρον τους ήταν το πετρέλαιο. Ο Denninger (1970), πρότεινε στο δεύτερο μέρος της εργασίας ένα πλαίσιο διαχείρισης με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους άντλησης του υπόγειου νερού. Η αντικειμενική συνάρτηση ήταν μη γραμμική γιατί το

κόστος είχε υποτεθεί πως ήταν ανάλογο με την παροχή άντλησης και το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα. Χρησιμοποιήθηκε ο τετραγωνικός προγραμματισμός, αλλά δεν παρουσιάστηκε λύση στο πρόβλημα.

Ο Maddock εφάρμοσε πρώτος ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης στην οικονομική διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων, μέσα από μια σειρά εργασιών. Το πρώτο πρόβλημα (Maddock, 1972a), το οποίο ήταν μη γραμμικό, στόχευε στην ελαχιστοποίηση του κόστους άντλησης, με περιορισμούς στα υδραυλικά ύψη και στην καθεμία παροχή του πηγαδιού σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Ανέπτυξε τη μέθοδο του μοναδιαίου μητρώου απόκρισης, την οποία αποκαλούσε αλγεβρική τεχνολογική συνάρτηση. Ο υδροφορέας, στον οποίο η άντληση των τριών πηγαδιών μελετήθηκε για δέκα χρονικές περιόδους, ήταν ετερογενής. Ένα πακέτο τετραγωνικού προγραμματισμού (Karash, 1962) χρησιμοποιήθηκε για την επίλυσή του προβλήματος. Στη συνέχεια (Maddock, 1972b), στόχευε στη εύρεση του βέλτιστου πηγαδιού και στη μείωση του κόστους άντλησης και εγκατάστασης, με τους ίδιους περιορισμούς. Ανέπτυξε ένα μικτό ακέραιο τετραγωνικό προγραμματισμό για την επίλυση του και ακολούθησε ανάλυση ευαισθησίας για την εκτίμηση της επίδρασης της αβεβαιότητας οικονομικών και υδρολογικών παραγόντων στα αποτελέσματα. Έναν χρόνο μετά (Maddock, 1973), επέλυσε σε έναν υποθετικό υπόγειο υδροφορέα ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης του καθαρού κέρδους από τις καλλιέργειες, οι οποίες αρδεύονταν από ένα συγκεκριμένο αριθμό γεωτρήσεων. Πρότεινε μια πολύπλοκη αντικειμενική συνάρτηση συνυπολογίζοντας τα λειτουργικά κόστη και το κόστος άντλησης.

Μία πολύ εμπεριστατωμένη δουλειά με αντίκτυπο στην περιοχή μελέτης ήταν του Rastogi (1989). Η αρμόδια υπηρεσία για τη διαχείριση των υδάτων της πόλης Humboldt Bay στη Βόρεια Καλιφόρνια, στόχευε στη διάνοιξη και λειτουργία δέκα επιπλέον γεωτρήσεων από τον φρεάτιο υπόγειο υδροφορέα της Blue Lake, για την ύδρευση των γύρω οικισμών. Στόχος της υπηρεσίας ήταν η επιθυμητή άντληση $23 \cdot 10^6$ gallons/day ($1 \text{ m}^3 = 219.97$ gallons) να πραγματοποιείται με το λιγότερο κόστος. Η αντικειμενική συνάρτηση συμπεριέλαβε το κόστος της κατανάλωσης της ενέργειας και της συντήρησης. Οι περιορισμοί αφορούσαν τα υδραυλικά ύψη του υδροφορέα στα κελιά των γεωτρήσεων (επιτρεπόμενη πτώση στο μισό του προ αντλήσεων υδραυλικού ύψους) και το άθροισμα των παροχών αντλήσεων στον επιθυμητό ημερήσιο στόχο. Το μη γραμμικό πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με τη μέθοδο της ενσωμάτωσης και έδωσε τη βέλτιστη λύση, η οποία έδωσε κέρδος στους διαχειριστές 20000\$ το χρόνο.

Οι Ahlfeld και Heidari (1994), μέσα από τη βιβλιογραφική τους ανασκόπηση για τις εφαρμογές του βέλτιστου υδραυλικού ελέγχου στα υπόγεια υδατικά συστήματα πρότειναν μια πιο γενική αντικειμενική συνάρτηση εμπεριέχοντας και οικονομικούς όρους και μάλιστα την κατηγοριοποίησαν ανάλογα με τη χρησιμότητα της είτε στη μεγιστοποίηση του καθαρού κέρδους, είτε στην ελαχιστοποίηση του κόστους. Κάνουν ιδιαίτερη αναφορά στις κατηγορίες κόστους, αλλά επισημαίνουν πως αυτό έγκειται στην κρίση του διαχειριστή και στην ιδιαιτερότητα του κάθε προβλήματος.

Ο Theodossiou (2004), σε ένα πρόβλημα διαχείρισης – το οποίο θα αναπτυχθεί σε επόμενο κεφάλαιο – του φρεάτιου υπόγειου υδροφορέα της περιοχής Κοκκινοχώρια της Ανατολικής Κύπρου στόχευε στην μείωση του κόστους της άντλησης του υπόγειου ύδατος και μεταφοράς αυτού με περιορισμό στα υδραυλικά ύψη, αποτρέποντας την ξηρασία του υδροφορέα και στην συνολική αντλούμενη ποσότητα υπόγειου ύδατος, ώστε να ικανοποιηθεί η ζήτηση. Παρόλα αυτά η αντικειμενική του συνάρτηση δεν εξέφραζε ακριβώς το κόστος, αλλά ένα αντιπροσωπευτικό μέτρο αυτού.

Οι Liu et. al. (2008), επίλυσαν δύο μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης με μελλοντική περίοδο διαχείρισης (έτος στόχος 2055), για τον υπόγειο υδατικό σύστημα της πεδιάδας της Βόρειας Κίνας. Οι περιορισμοί ήταν οι ίδιοι (περιορισμός υδραυλικού ύψους με κατώτερο οικολογικό όριο, περιορισμός στο σύνολο του αντλούμενου όγκου και στις παροχές των πηγαδιών άντλησης) για τα δύο προβλήματα, ενώ η διαφορά τους εντοπιζόταν στην αντικειμενική συνάρτηση. Στο πρώτο πρόβλημα στόχος ήταν η αύξηση του συνολικού αντλούμενου όγκου και στο δεύτερο ήταν η μείωση του συνολικού κόστους άντλησης. Το κόστος που συμπεριελάβανε στην αντικειμενική συνάρτηση αφορούσε μόνο τη λειτουργία των γεωτρήσεων και τόνισαν πως δεν συνυπολογίζουν τα άλλα κόστη (συντήρησης, εγκατάστασης,, κ.α.) λόγω της αβεβαιότητας που υπήρχε σε αυτή την πληροφορία, η οποία θα αλλοίωνε τα αποτελέσματα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έδειξε διαφορές ανάμεσα στις δύο βέλτιστες λύσεις, με τους συγγραφείς να καταλήγουν στη σημαντική αξία που έχει στη διαχείριση η εισαγωγή οικονομικών όρων στην αντικειμενική συνάρτηση.

Οι Ayvaz και Elci (2013), κατέστρωσαν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης στον φρεάτιο υπόγειο υδροφορέα της λεκάνης απορροής Tahtali στη Σμύρνη. Στόχος τους ήταν η βέλτιστη χωροθέτηση νέων υδρευτικών γεωτρήσεων που επρόκειτο να εγκατασταθούν και η λειτουργία τους με το λιγότερο κόστος. Εξέτασαν διαφορετικά σενάρια ως προς τη θέση και τον αριθμό των νέων πηγαδιών. Επειδή τους ενδιέφερε η εγκατάσταση από την αρχή, τα κόστη που συνυπολογίζονταν στην αντικειμενική συνάρτηση ήταν αυτά της εγκατάστασης, του εξοπλισμού, της συντήρησης και της λειτουργίας. Οι περιορισμοί αφορούσαν το σύνολο της αντλούμενης ποσότητας να ικανοποιεί την απαίτηση των $90000\text{m}^3/\text{day}$, την επιμέρους παροχή άντλησης του κάθε πηγαδιού σύμφωνα με τις προδιαγραφές και την πτώση στάθμης του υδραυλικού φορτίου στο κελιά των πηγαδιών για την αποφυγή ξήρανσης αυτών.

Η σύγκριση των εργασιών του Theodossiou (2004) και των Ayvaz και Elci (2013) αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού που ανέφεραν οι Ahlfeld και Heidari (1994) ως προς την επιλογή του κατάλληλου κόστους στην αντικειμενική συνάρτηση. Τον Theodossiou (2004) δεν τον ενδιαφέρει η εγκατάσταση νέων γεωτρήσεων διότι το δίκτυο υπάρχει, αλλά τον ενδιαφέρει η μεταφορά του νερού, ενώ τους Ayvaz και Elci (2013) τους ενδιαφέρει η εγκατάσταση νέων γεωτρήσεων, για αυτό και λαμβάνουν υπόψη το κόστος εγκατάστασης και εξοπλισμού. Στην εν λόγω έρευνα, το δίκτυο των γεωτρήσεων υφίσταται, οπότε δεν συνυπολογίζονται κόστη εγκατάστασης και εξοπλισμού. Από την άλλη δεν ενδιαφέρει τον διαχειριστή το κόστος μεταφοράς του

νερού μιας και αυτό είναι υπόθεση των καλλιεργητών της περιοχής, όπως πάντα συνέβαινε.

Εφαρμογές διαφόρων προβλημάτων βελτιστοποίησης σε υπόγειους υδροφορείς της Ελλάδος έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοσθεί από πολλούς ερευνητές εδώ και τρεις δεκαετίες. Από τη βιβλιογραφική αναζήτηση η πρώτη εφαρμογή της μεθόδου σε πραγματικό – μόνιμο όμως - πρόβλημα υπόγειου υδροφορέα είναι αυτή των Tolikas et. al., (1983). Ο λόγος ήταν η πρόταση μιας βέλτιστης και βιώσιμης διαχείρισης για τον υπό πίεση υπόγειο υδροφορέα της βιομηχανικής περιοχής της Πτολεμαΐδας μιας και παρατηρούταν σημαντική υποβάθμισης των υδραυλικών υψών λόγω της υπεράντλησης. Στόχος ήταν η μεγιστοποίηση των αντλήσεων με περιορισμό στα υδραυλικά ύψη των κελιών των γεωτρήσεων. Το πρόβλημα ήταν γραμμικό και επιλύθηκε με τη μέθοδο Simplex.

Από τις πρώτες, επίσης, εργασίες είναι αυτή των Myloroulos et. al. (1988), στην οποία έκαναν χρήση του γραμμικού προγραμματισμού για το βέλτιστο τρόπο απομάκρυνσης ρυπαντή του υπόγειου ύδατος από μια γεώτρηση άντλησης. Η αντικειμενική συνάρτηση αφορούσε τη μεγιστοποίηση της άντλησης του ρυπογόνου υπόγειου ύδατος και οι περιορισμοί απέτρεπαν την εξάπλωση του ρυπαντή σε άλλες κατευθύνσεις. Εξέτασαν εναλλακτικά διαχειριστικά σενάρια ως προς τον τρόπο άντλησης και οδηγήθηκαν σε σημαντικά συμπεράσματα για αυτά.

Ο Psilovikos (1999a) σύγκρινε δύο μεθόδους βελτιστοποίησης με πεδίο μελέτης το διασυνωριακό φρεάτιο υπόγειο υδροφορέα (Σκόπια-Ελλάδα) στην περιοχή του οικισμού Ειδομένη στο νομό Κιλκίς. Οι μέθοδοι αυτές ήταν ο γραμμικός και ο μικτός ακέραιος προγραμματισμός. Στο γραμμικό πρόβλημα, η αντικειμενική συνάρτηση είχε σαν στόχο τη μεγιστοποίηση των αντλήσεων. Στο μικτό ακέραιο, η αντικειμενική συνάρτηση είχε σαν στόχο την βέλτιστη θέση των πηγαδιών άντλησης. Οι περιορισμοί κοινοί (περιορισμός υδραυλικού ύψους θέτοντας ένα κατώτερο όριο, περιορισμός στο σύνολο του αντλούμενο όγκου και στις παροχές των πηγαδιών άντλησης), συν ένα παραπάνω που είχε ο μικτός ακέραιος που είχε να κάνει με το ανώτερο όριο του αριθμού των πηγαδιών άντλησης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έδειξε πως ο γραμμικός προγραμματισμός ήταν πιο γρήγορος σε υπολογιστικό χρόνο, πιο ευρύς και γενικός στη χρήση του, χρησιμοποίησε όλα τα προτεινόμενα πηγάδια (με μικρότερες παροχές), αλλά ο μικτός ακέραιος υπερτερούσε στην επιλογή των βέλτιστων θέσεων των πηγαδιών άντλησης.

Οι Karterakis et. al. (2007), σύγκριναν μία μέθοδο διαδοχικού προγραμματισμού – την τμηματικά γραμμική μέθοδο (Bruner, 1980) - με έναν αλγόριθμο διαφορικής εξέλιξης, για τη βέλτιστη διαχείριση του καρστικού παράκτιου υπόγειου υδροφορέα της Χερσονήσου, στο νομό Ηρακλείου της Κρήτης, ώστε να αποτραπεί η διείσδυση θαλασσινού νερού σε αυτόν. Αντικειμενική συνάρτηση ήταν η μεγιστοποίηση των αντλήσεων τεσσάρων προτεινόμενων πηγαδιών με περιορισμούς στα υδραυλικά ύψη (κατώτερο όριο στα 102.5 μ. για την αποφυγή της εισροής αλμυρού νερού) και στις παροχές των γεωτρήσεων. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι βέλτιστες λύσεις των δύο

μεθόδων ήταν πολύ κοντά καθιστώντας τη μέθοδο διαδοχικού προγραμματισμού αξιόπιστη σε μη γραμμικά προβλήματα.

Πρόσφατα, οι Pisinaras et. al., (2013) παρουσίασαν, μέσω ενός πραγματικού προβλήματος βελτιστοποίησης, τη χρησιμότητα της μεθόδου στη λήψη αποφάσεων για τη διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων. Περιοχή μελέτης ήταν ο υπόγειος υδροφορέας της λεκάνης απορροής του ποταμού Κόσυνθου στο νομό Ξάνθης, μιας λεκάνης καθαρά αγροτικής. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης τέθηκε ως εξής: Μεγιστοποίηση των αντλήσεων με περιορισμό το υδραυλικό ύψος στα κελιά των γεωτρήσεων να μην πέσει κάτω από τη στάθμη της θάλασσας. Η εφαρμογή της βελτιστοποίησης έγινε για έξι σενάρια κλιματικής αλλαγής, ένα σενάριο ξηράς περιόδου και ένα σενάριο αποψίλωσης του δάσους της λεκάνης, ώστε να εκτιμηθεί η απόκριση του υδροφορέα. Πραγματοποιήθηκαν και επιπλέον τρία σενάρια ως προς τη ζήτηση του υπόγειου ύδατος, τα οποία δεν αντιμετωπίστηκαν μέσω της βελτιστοποίησης, μιας και η άντληση ήταν ήδη καθορισμένη. Τα αποτελέσματα παρουσίασαν τη σημαντική συμβολή της βελτιστοποίησης, η οποία έδωσε λύση για την αποφυγή της πτώσης του υδροφόρου ορίζοντα κάτω από τη στάθμη της θάλασσας και αποφυγή εισροής αλμυρού ύδατος υπό την εξέταση πλήθους σεναρίων.

Ο διαδοχικός γραμμικός προγραμματισμός έχει εφαρμοσθεί επιτυχώς σε πραγματικά προβλήματα διαχείρισης υδροφορέων ήπιων μη γραμμικών προβλημάτων. Παρουσιάζοντα οι πιο πρόσφατες. Η περίπτωση των Ahlfield και Baro-Mentes (2008) έχει αρκετά κοινά στοιχεία με τον τρόπο επίλυσης του μη γραμμικού προβλήματος της βελτιστοποίησης με την εν λόγω έρευνα. Ο πρώτος είναι ένας από τους τρεις δημιουργούς του διαχειριστικού μοντέλου GWM, το οποίο εφάρμοσε επιτυχώς σε συνδυασμό με το μαθηματικό κώδικα MODFLOW 2000, κάνοντας χρήση του διαδοχικού γραμμικού προγραμματισμού σε έναν φρεάτιο υδροφορέα στην κοιλάδα Antelope της Καλιφόρνιας. Στόχος του διαχειριστικού προβλήματος ήταν η μεγιστοποίηση των αντλήσεων με περιορισμούς κατώτερα όρια του υδροφόρου ορίζοντα. Η μόνη πηγή μη γραμμικότητας ήταν η σχέση των υδραυλικών υψών με τις παροχές των πηγαδιών λόγω του φρεάτιου υπόγειου υδροφορέα. Οι βέλτιστες λύσεις βρέθηκαν έπειτα από μικρό αριθμό επαναλήψεων και τα αποτελέσματα κρίθηκαν αξιόπιστα.

Οι Banta και Paschke (2012) υλοποίησαν μια επιστημονική μελέτη για τον υδροφορέα Arapahoe του Denver εκ μέρους της U.S.G.S, σε συνεργασία με το Συμβούλιο Διατήρησης Ύδατος του Colorado. Σκοπός της μελέτης ήταν να προτείνουν βέλτιστες παροχές συγκεκριμένων πηγαδιών άρδευσης για την περίοδο 2010-2109 στο πλαίσιο της βιώσιμης διαχείρισης του υπόγειου υδροφορέα. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης είναι απλό. Μεγιστοποίηση της άντλησης συγκεκριμένων πηγαδιών ύδρευσης με περιορισμούς ένα ανώτερο όριο στις παροχές των πηγαδιών και ένα κατώτερο όριο στα υδραυλικά ύψη. Όμως, από προηγούμενες προσομοιώσεις του υπόγειου υδροφορέα παρουσιάστηκαν μη γραμμικότητες στις σχέσεις των παροχών και των υδραυλικών υψών (Banta et al., 2011) και έτσι το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με το διαδοχικό γραμμικό προγραμματισμό. Ο εν λόγω προγραμματισμός έδωσε βέλτιστες λύσεις για

κάθε πηγάδι και για όλη την περίοδο διαχείρισης. Από τα αποτελέσματα προέκυψαν χάρτες υδραυλικών υψών του υδροφορέα προβλέποντας έτσι την μελλοντική του απόκριση.

Πρόσφατα, οι Singh et al. (2013) χρησιμοποίησαν το διαδοχικό γραμμικό προγραμματισμό σε ένα όχι και τόσο απλό πρόβλημα διαχείρισης για το υπόγειο υδατικό σύστημα της πόλης της Lucknow της Ινδίας. Το πρόβλημα περιείχε τόσο οικολογικούς όσο και κοινωνικούς περιορισμούς. Στόχος της βελτιστοποίησης ήταν και εδώ η μεγιστοποίηση των αντλήσεων με δύο οικολογικούς περιορισμούς (ελάχιστο όριο εκροής υπόγειου ύδατος στον ποταμό Gomti για την εξασφάλιση της οικολογικής του παροχής και ελάχιστο όριο υδραυλικών υψών για την αποφυγή ξηρασίας του υπόγειου υδροφορέα) και ένα κοινωνικό (μέγιστο όριο πτώσης του υδροφορέα σε συγκεκριμένη περιοχή πέριξ της πόλης για την προστασία της ποσότητας και ποιότητας του προς ύδρευση νερού). Και εδώ η μη γραμμικότητα οφειλόταν στη σχέση της πτώσης στάθμης με τις παροχές άντλησης των πηγαδιών μιας και ο υδροφορέας είναι φρεάτιος. Ακολούθησε ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων για να εξετάσουν την αξιοπιστία τους μέσω της απόκρισης του υπόγειου υδροφορέα.

Σε εθνικό επίπεδο οι Sidiropoulos et. al. (2013), έκαναν χρήση της μεθόδου για τη βέλτιστη διαχείριση του φρεάτιου υπόγειου υδροφορέα της λίμνης Κάρλας υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής, για την επόμενη τριακονταετία, με την παράλληλη λειτουργία του ταμιευτήρα της Κάρλας. Στόχος ήταν η μεγιστοποίηση των αντλήσεων και η βέλτιστη θέση των πηγαδιών άντλησης, με περιορισμό την ανάταση του υπόγειου υδροφορέα κάτω από δύο σενάρια κλιματικής αλλαγής. Η μέθοδος έδωσε λύσεις μετά από μικρό αριθμό επαναλήψεων και ακολούθησε σύγκριση αυτών για κάθε σενάριο μέσω της απόκρισης του υδροφορέα.

Στα παραδείγματα των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν, αλλά και άλλων από τη βιβλιογραφία δε γίνεται ιδιαίτερη μνεία στον περιορισμό της πτώσης του υδραυλικού ύψους, ιδιαίτερα σε αυτά που η αντικειμενική τους αξία εμπεριέχει οικονομικούς όρους. Επιπροσθέτως, ο περιορισμός στις αντλήσεις είναι να ικανοποιηθεί η ζήτηση. Παρόλο που κάποιες από αυτές στοχεύουν πιο πολύ στην ανάδειξη του μαθηματικού προβλήματος και προτείνουν όντως πρωτοπόρες μεθόδους, η επιλογή των περιορισμών πρέπει να απαιτεί περισσότερη προσοχή και να προκύπτουν από περαιτέρω ανάλυση μιας και οι διαχειριστές έχουν τα εργαλεία να το εκτιμήσουν αυτό. Αυτό που προτείνει η εν λόγω έρευνα και θα διατυπωθεί στα παρακάτω κεφάλαια αναλυτικά είναι ο καθορισμός ενός οικολογικού κατώτερου ορίου υδραυλικών υψών, το οποίο να προστατεύει τον υπόγειο υδροφορέα από την εκμετάλλευση των μη ανανεώσιμων αποθεμάτων του. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί και μέσω του περιορισμού στο σύνολο των αντλήσεων με το να εκτιμήσει ο διαχειριστής με τη χρήση του μοντέλου προσομοίωσης τα ανανεώσιμα αποθέματα ακόμη και για μελλοντική περίοδο διαχείρισης, Ακόμη και στις περιπτώσεις λοιπόν της αποφυγής εισροής θαλασσινού νερού, πρώτη μέριμνα πρέπει να αποτελεί το οικολογικό όριο και αν όντως είναι κατώτερο του ορίου για την αποφυγή της αλμυρής σφήνας να επιλεγεί το όριο αυτής. Στην εν λόγω έρευνα, λόγω της υπερεκμετάλλευσης του υπόγειου υδροφορέα και της σημαντικής ταπείνωσης του, το

οικολογικό αυτό όριο τίθεται και επιπλέον δεν απαιτείται να ικανοποιηθεί η ζήτηση των χρηστών ως περιορισμός στο συνολικό αντλούμενο όγκο. Ο καθορισμός του οικολογικού υδραυλικού ύψους ή της μέγιστης συνολικής αντλούμενης ποσότητας ώστε να μην εκμεταλλεύονται τα μη ανανεώσιμα αποθέματα του υπόγειου υδροφορέα επιδεικνύει τη μεγάλη χρησιμότητα των μοντέλων προσομοίωσης στη διαχείριση/βελτιστοποίηση και για αυτό θα γίνει ιδιαίτερη αναφορά σε επόμενο κεφάλαιο.

3.3. Προσομοίωση – Βελτιστοποίηση υπόγειων υδατικών πόρων.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η ανάγκη της βελτιστοποίησης στα προβλήματα διαχείρισης υπόγειων υδατικών συστημάτων μέσα από ένα πλήθος εργασιών. Παρόλο που έγινε αναφορά σε κάποιες εργασίες που παρουσιάζουν κοινά στοιχεία ως προς τον οικονομικό παράγοντα, το διαδοχικό γραμμικό προγραμματισμό και τον εθνικό τους χαρακτήρα, πρέπει εδώ να ξεκαθαριστεί πως τα αποτελέσματα όλων αυτών των εργασιών ακόμη και των πρόδρομων δεν οφείλονται αποκλειστικά στις δυνατότητες του μοντέλου βελτιστοποίησης, αλλά στο συνδυασμό αυτών με μοντέλα προσομοίωσης.

Η συνδυασμένη χρήση των μοντέλων προσομοίωσης-βελτιστοποίησης αποτελεί τα τελευταία χρόνια την πιο ισχυρή και χρήσιμη μέθοδο για τον καθορισμό στρατηγικών διαχείρισης και σχεδιασμού για τη βέλτιστη και βιώσιμη χρήση των υπόγειων υδροφορέων. Για να εξασφαλισθεί το γεγονός ότι η τελική βέλτιστη λύση δε θα παραβιάζει τους φυσικούς νόμους του συστήματος, ένα μοντέλο το οποίο προσομοιώνει τη συμπεριφορά και την απόκριση του συστήματος συνδέεται με το μοντέλο διαχείρισης. Εφόσον καταστρωθούν η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί του μοντέλου βελτιστοποίησης, ένα κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο καλείται να καθορίσει τη λύση. Με άλλα λόγια η συνεργασία τους, που είναι και το πιο σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου, έγκειται στο εξής: Το μοντέλο διαχείρισης/βελτιστοποίησης βρίσκει τη βέλτιστη λύση με βάση την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς που έχουν τεθεί από το διαχειριστή. Το μοντέλο προσομοίωσης υπακούει στο μοντέλο διαχείρισης/βελτιστοποίησης και βρίσκοντας την απόκριση του συστήματος επιβεβαιώνει αν η λύση αυτή υπακούει στους φυσικούς νόμους του. Επίσης το μοντέλο προσομοίωσης ελέγχει και την σκοπιμότητα της λύσης αυτής.

Σύμφωνα με τον Wagner (1995), η προσέγγιση της συνδυασμένης προσομοίωσης-βελτιστοποίησης είναι προτιμητέα επειδή μπορεί και εκτιμά την περίπλοκη συμπεριφορά του υπόγειου υδατικού συστήματος και αναγνωρίζει την καλύτερη διαχειριστική στρατηγική λαμβάνοντας υπόψη τους στόχους και περιορισμούς της βελτιστοποίησης. Οι Ahlfeld and Mulligan (2000) επισημαίνουν πως ο συνδυασμός μοντέλων προσομοίωσης-βελτιστοποίησης είναι πλέον ο καταλληλότερος τρόπος για τη διαχείριση των υπόγειων υδροφορέων.

Σύμφωνα με τους Barlow et. al. (1996), η γενική διαδικασία για την ανάπτυξη ενός διαχειριστικού μοντέλου προσομοίωσης-βελτιστοποίησης απαιτεί πλήθος βημάτων, τα οποία είναι:

- Συλλογή και ανάλυση δεδομένων.
- Ανάπτυξη ενός εννοιολογικού μοντέλου για τον καθορισμό του συστήματος υπόγειας ροής.
- Ανάπτυξη, ρύθμιση και πιστοποίηση του μοντέλου προσομοίωσης των υπόγειων υδάτων.
- Καθορισμός του προβλήματος βελτιστοποίησης.
- Επίλυση του διαχειριστικού μοντέλου προσομοίωσης-βελτιστοποίησης για διάφορα εναλλακτικά διαχειριστικά σενάρια.

Κάποια από τα παραπάνω βήματα εμπεριέχονται και στις γενικές αρχές κατάρτισης ενός μοντέλου προσομοίωσης. Είναι όμως ενδιαφέρον, πλέον, πως η επιστήμη αυτή αντιμετωπίζει το σύστημα μοντέλων προσομοίωσης-βελτιστοποίησης. Τα αντιμετωπίζει ως ένα και σε αυτό οφείλεται το γεγονός πως δε μπορεί πλέον η χρησιμότητα ενός μοντέλου προσομοίωσης υπόγειων υδατικών συστημάτων να σταματά στην εκτίμηση των υδραυλικών υψών ή του ισοζυγίου αυτών, αλλά και να συνεισφέρει στη διαχείριση αυτών ώστε να αντιμετωπιστούν προβλήματα που έχουν ανακύψει ή να προληφθούν αυτά.

Η σύνδεση των παραπάνω μοντέλων γίνεται είτε χρησιμοποιώντας τους περιορισμούς που διέπουν την λειτουργία του συστήματος απ' ευθείας στο μοντέλο βελτιστοποίησης είτε χρησιμοποιώντας ένα μητρώο απόκρισης (Gorelick, 1983) ή ένα εξωτερικό μοντέλο προσομοίωσης. Η σύνδεση αυτή είναι μία πολύπλοκη και δύσκολη διαδικασία από την οποία εξαρτάται η επιτυχία της επίλυσης.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ενσωμάτωση του μοντέλου προσομοίωσης μέσα στο μοντέλο διαχείρισης είναι η τεχνική ενσωμάτωσης (embedding technique) και η τεχνική προσέγγισης με μητρώο απόκρισης (response matrix approach).

Στην τεχνική ενσωμάτωσης, η πεπερασμένη διαφορά ή η πεπερασμένη μορφή του στοιχείου των κυρίαρχων εξισώσεων υπόγειας ροής και μεταφοράς των ρευστών, ενσωματώνεται απευθείας σε μέρος των περιορισμών σε ένα τυπικό μαθηματικό μοντέλο διαχείρισης. Άλλοι φυσικοί και διαχειριστικοί περιορισμοί σε υδραυλικά φορτία, κλίσεις, ταχύτητες ή ρυθμούς άντλησης/εμπλουτισμού μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν. Κάποιες από τις άγνωστες μεταβλητές όπως τα υδραυλικά φορτία, οι απόλυτες τιμές συγκέντρωσης κλπ μπορούν να γίνουν μεταβλητές απόφασης (decision variables) στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Όταν χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός κελιών άντλησης και το πρόβλημα διαχείρισης είναι σταθερό (steady state) τότε η τεχνική ενσωμάτωσης απαιτεί μικρότερη υπολογιστική μνήμη, άρα μικρότερο χρόνο επεξεργασίας απ' ό,τι η μέθοδος με μητρώο απόκρισης (Peralta and Datta, 1990). Σε μη σταθερές περιπτώσεις (transient state) αυτό δεν ισχύει. Επίσης σε μη γραμμικά συστήματα, η χρήση της τεχνικής ενσωμάτωσης είναι μονόδρομος. Παρόλα αυτά σε ιδιαίτερα μη γραμμικά προβλήματα, όπου η χρήση μητρώου απόκρισης δεν είναι

εφαρμόσιμη, ένα μοντέλο διαχείρισης ακόμα και για μικρή περιοχή μελέτης μπορεί να είναι ιδιαίτερα μεγάλο σε διαστάσεις και άρα η επίτευξη λύσης να γίνεται πολύ δύσκολη.

Η τεχνική προσέγγισης με μητρώο απόκρισης (Gorelick, 1983) χρησιμοποιεί ένα εξωτερικό μοντέλο υπόγειας προσομοίωσης των υδάτων για να παράξει τις μονάδες απόκρισης. Η μονάδα απόκρισης περιγράφει την επίδραση μίας μονάδας αλλαγής μίας ανεξάρτητης μεταβλητής απόφασης (ή μεταβλητής σχεδιασμού) σε προκαθορισμένες θέσεις πηγαδιών, πάνω σε μια ποικιλία εξαρτημένων μεταβλητών ή άλλων μεταβλητών σχεδιασμού (όπως το υδραυλικό φορτίο, η ταχύτητα, η απόλυτη συγκέντρωση) σε συγκεκριμένες θέσεις παρατήρησης. Όλες αυτές οι μονάδες απόκρισης αποτελούν το μητρώο απόκρισης (response matrix) που περιλαμβάνεται στο μοντέλο διαχείρισης. Για να παραχθεί το μητρώο απόκρισης, ένα μοντέλο προσομοίωσης επιλύεται αρκετές φορές. Κάθε φορά με μία μονάδα πίεσης (unit stress) ή φορτία συγκέντρωσης (concentration loads) σε συγκεκριμένα σημεία. Η τεχνική αυτή βασίζεται στις αρχές της επαλληλίας και της γραμμικότητας (Reilly et. al., 1987). Είναι εφαρμόσιμη μόνο σε συστήματα γραμμικά ή σχεδόν γραμμικά και με ομοιογενή οριακές συνθήκες. Σε μη γραμμικά συστήματα η εφαρμογή της τεχνικής αυτής κρίνεται ανεπαρκής (Rosenwald & Green 1974).

Στην περίπτωση λοιπόν των προβλημάτων υπόγειας υδρολογίας ασκείται μια μοναδιαία άντληση σε κάθε πηγάδι και υπολογίζονται οι πτώσεις του υδραυλικού ύψους που αυτή δημιουργεί στα κελιά ελέγχου. Η μέθοδος αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε πηγάδι και έτσι χτίζεται το μητρώο με τους συντελεστές απόκρισης. Αν το πρόβλημα είναι μη μόνιμο η διαδικασία αυτή γίνεται για κάθε χρονική περίοδο. Πιο αναλυτικά, βασιζόμενοι στην Αλγεβρική Τεχνολογική Συνάρτηση (Algebraic Technological Function) του Maddock III (1974), η οποία είναι η θεμελιώδης συνάρτηση για τη σύνθεση της μεθόδου του μητρώου απόκρισης, ισχύει:

$$s(k,n) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^M \beta(k,j,n-i+1) \bullet Q(j,i) \quad (3.18)$$

όπου:

- $\beta(k,j,n-i+1)$ είναι η μεταβολή στην πτώση υδραυλικού ύψους στο k σημείο ελέγχου στο τέλος της n χρονικής περιόδου εξαιτίας της μοναδιαίας ποσότητας άντλησης υπόγειου ύδατος από το πηγάδι j κατά το i χρονικό βήμα
- $Q(j,i)$ είναι η ποσότητα άντλησης υπόγειου ύδατος από το πηγάδι j κατά το i χρονικό βήμα
- M είναι ο αριθμός των πηγαδιών άντλησης
- n είναι οι χρονικές περίοδοι
- $s(k,n)$ είναι πτώση του υδραυλικού ύψους στο σημείο ελέγχου k στο τέλος της n χρονικής περιόδου.

Το μητρώο, λοιπόν για ένα μόνιμο φαινόμενο καταρτίζεται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \dots \\ \Delta h_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} & \dots & \alpha_{1,N} \\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2} & \dots & \alpha_{2,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{M,1} & \alpha_{M,2} & \dots & \alpha_{M,N} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_N \end{bmatrix}$$

με τις διαστάσεις των μητρώων ως εξής $[M*1]=[M*N]*[N*1]$ αντίστοιχα και όπου:

- Δh_i , είναι το στοιχείο του μητρώου διανύσματος των πτώσεων του υδραυλικού ύψους στα σημεία/κελιά ελέγχου $i=1,\dots,M$ με διαστάσεις $[M*1]$
- a_{ij} , είναι ο συντελεστής του μητρώου απόκρισης που αντιπροσωπεύει την πτώση του υδραυλικού ύψους σε κάθε σημείο ελέγχου/κελιού $i=1,\dots,M$, το οποίο προκαλείται από τη μοναδιαία άντληση για κάθε ένα από τα $j=1,\dots,M$ πηγάδια διαχείρισης με διαστάσεις $[M*N]$
- Q_j , είναι το στοιχείο του μητρώου διανύσματος για τις τιμές άντλησης στα $j = 1,\dots,N$ με διαστάσεις $[N*1]$

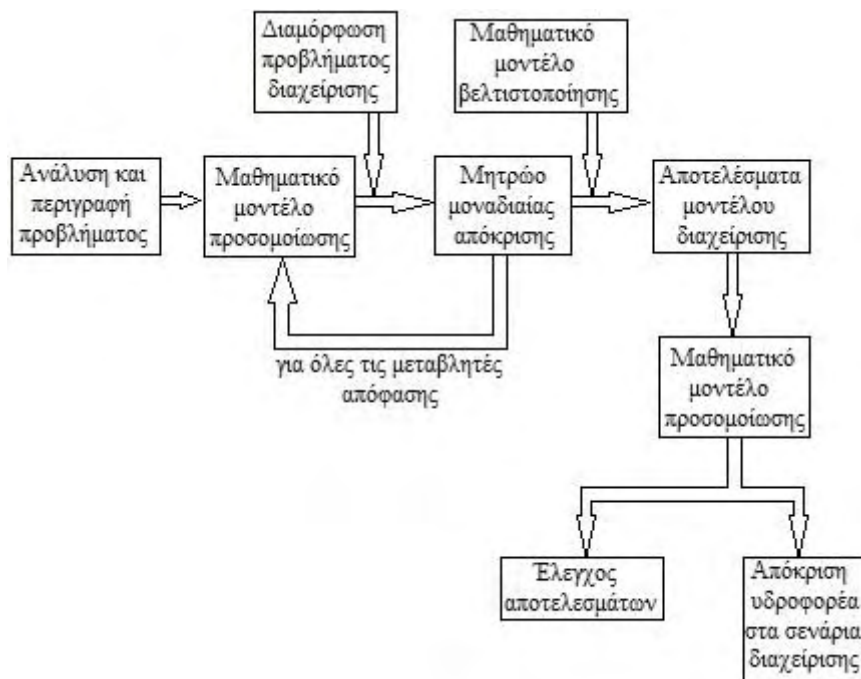
Ενώ, για ένα μη μόνιμο φαινόμενο καταρτίζεται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \overline{\Delta h}^{(1)} \\ \overline{\Delta h}^{(2)} \\ \dots \\ \overline{\Delta h}^{(T)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{a}^{(1)} & 0 & \dots & 0 \\ \overline{a}^{(2)} & \overline{a}^{(2)} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \overline{a}^{(T)} & \overline{a}^{(T-1)} & \dots & \overline{a}^{(1)} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \overline{Q}^{(1)} \\ \overline{Q}^{(2)} \\ \dots \\ \overline{Q}^{(T)} \end{bmatrix}$$

με τις διαστάσεις των μητρώων ως εξής $[[T*M]*1]=[[T*M]*[T*N]]*[[T*N]*1]$ αντίστοιχα και όπου τα στοιχεία του κάθε υπό μητρώου είναι τα εξής:

- $\overline{\Delta h}^{(k)} = [\Delta h_1^{(k)} \Delta h_2^{(k)} \dots \Delta h_M^{(k)}]^T$, είναι το μητρώο διανύσματος των πτώσεων των υδραυλικών υψών στα σημεία ελέγχου $i=1,\dots,M$, στο τέλος της χρονικής περιόδου $k=1,\dots,T$. Οι διαστάσεις του είναι $T*[M*1]$.
- $\overline{a}^{(1)}$, είναι το μοναδιαίο μητρώο απόκρισης, που αντιστοιχεί στο τέλος της διαχειριστικής περιόδου, δηλαδή στη χρονική περίοδο T και αποτελείται από τις πτώσεις των υδραυλικών υψών, που προκαλούνται από τις αντλήσεις της ίδιας περιόδου
- $\overline{a}^{(1)}, \dots, \overline{a}^{(T-1)}, \overline{a}^{(T)}$, είναι τα μοναδιαία μητρώα απόκρισης που αναφέρονται στο τέλος της διαχειριστικής περιόδου, δηλαδή στη χρονική περίοδο T και αποτελείται από τις πτώσεις των υδραυλικών υψών, που προκαλούνται από τις αντλήσεις των περιόδων $[k=T-1], \dots [k=2], [k=1]$ αντίστοιχα.

Ο Theodossiou (2004) παρουσίασε γραφικά τη διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου του μητρώου απόκρισης, όπως φαίνεται στο κάτωθι σχήμα:



Σχήμα 3. 4. Διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου του μητρώου μοναδιαίας απόκρισης σύμφωνα με τον Theodossiou (2004)

Στην εν λόγω έρευνα επιλέχθηκε η μέθοδος του μητρώου απόκρισης μιας και όπως αναφέρθηκε προηγουμένως πραγματοποιήθηκε γραμμικοποίηση του ήπιου μη γραμμικού προβλήματος με το διαδοχικό γραμμικό προγραμματισμό. Επιπλέον το ποσοστό του αριθμού, τόσο των κελιών όπου βρίσκονται τα πηγάδια άντλησης όσο και αυτών που εφαρμόζονται οι περιορισμοί στα υδραυλικά ύψη είναι μικρό σε σχέση με όλα τα κελιά του καννάβου (Peralta et. al., 1991).

Οι Lee και Aronafsky (1958), ήταν οι πρώτοι που πρότειναν τη μέθοδο του μητρώου απόκρισης στο πρόβλημα που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ο λόγος ήταν η γραμμική μετατροπή των αντλήσεων σε μεταβολές πίεσης σε υδροφορέα πετρελαίου. Το μητρώο των συντελεστών πίεσης αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας μια αναλυτική λύση στην εξίσωση ροής (Van Everdingena και Hurst, 1949). Από τις αρχές της δεκαετίας του '70 η μέθοδος εφαρμόστηκε και σε προβλήματα διαχείρισης υπόγειων υδατικών συστημάτων. Ο Denninger (1970) τη χρησιμοποίησε για ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης της άντλησης από ένα πεδίο πηγαιών. Πρότεινε, οι αποκρίσεις των πτώσεων στάθμης να υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Theis (1935). Ο Maddock (1972a, 1972b, 1973), όμως, ήταν αυτός που πρώτος χρησιμοποίησε τη μέθοδο του μητρώου απόκρισης για τα προβλήματα βελτιστοποίησης με οικονομικούς όρους, την οποία αποκαλούσε αλγεβρική τεχνολογική συνάρτηση. Μάλιστα διατύπωσε και τη μεθοδολογία της που η ίδια παραμένει ως σήμερα. Τα προβλήματα έχουν περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Με την πάροδο των χρόνων, όπου η υπολογιστική δύναμη μεγάλωνε, τα προβλήματα μπορούσαν να γίνουν πιο πολύπλοκα. Έτσι οι Larson et. al. (1977) ανέπτυξαν ένα διαχειριστικό μοντέλο για τον καθορισμό της «ασφαλούς απόδοσης» του υπόγειου υδροφορέα Carmel στην Indiana. Στόχος η μεγιστοποίηση της μόνιμης άντλησης των

199 υφιστάμενων γεωτρήσεων στην περιοχή μελέτης. Ο περιορισμοί τέθηκαν για ένα κατώτερο όριο στην άντληση του κάθε πηγαδιού και ένα ανώτερο που αφορούσε την ισχύς αυτού, έναν κατώτερο αριθμό πηγαδιών και ένα ελάχιστο όριο υδραυλικού ύψους ίσο με το μισό πάχος του υδροφόρου στρώματος. Εφόσον ο υδροφορέας ήταν φρεάτιος, το πρόβλημα ήταν μη γραμμικό. Για τη γραμμικοποίηση του προβλήματος, θεωρήθηκε πως ο υδροφορέας είναι υπό πίεση (Jacob, 1944) και έτσι με τη χρήση του μητρώου απόκρισης εκτιμήθηκαν οι πτώσεις από τις μοναδιαίες αντλήσεις των πηγαδιών. Η βέλτιστη λύση έδωσε 26 πηγάδια άντλησης και τις παροχές. Ακολούθησε για συγκριτικούς λόγους και λύση με μη γραμμικό προγραμματισμό και τα αποτελέσματα δεν είχαν μεγάλες αποκλίσεις καταλήγοντας στο συμπέρασμα πως η παραδοχή που έγινε για τη γραμμικοποίηση ήταν επιτυχής. Αυτό οφείλεται στην ήπια γραμμικότητα του προβλήματος μιας και η μόνο συνθήκη μη γραμμικότητας ήταν η σχέση των υδραυλικών υψών με τις παροχές των γεωτρήσεων λόγω του φρεάτιου υδροφορέα, μια κατάσταση που έχει εμφανισθεί και αντιμετωπιστεί επιτυχώς σε πολλά άλλα πραγματικά προβλήματα.

Την ίδια μέθοδο γραμμικοποίησης, καθώς και τη χρήση του μοναδιαίου μητρώου απόκρισης, χρησιμοποίησε και ο Heidari (1982) σε ένα ήπιο μη γραμμικό πρόβλημα με στόχο τη μεγιστοποίηση των αντλήσεων στον φρεάτιο υπόγειο υδροφορέα της κοιλάδας Pawnee στο δυτικό-κεντρικό Kansas.

O Willis (1983), εφάρμοσε τη προσέγγιση του μητρώου απόκρισης στον φρεάτιο υπόγειο υδροφορέα της αγροτική λεκάνη Yu Lin στην Taiwan. Το πρόβλημα του μη γραμμικού προγραμματισμού αφορούσε τον καθορισμό του βέλτιστου σχεδίου άντλησης για τρεις συνεχόμενες περιόδους ώστε να ικανοποιηθούν οι υδατικές αρδευτικές ανάγκες. Η αντικειμενική συνάρτηση στόχευε στη μεγιστοποίηση των υδραυλικών υψών και στην ελαχιστοποίηση της έλλειψης του συνολικού ύδατος. Οι περιορισμοί αφορούσαν την ικανοποίηση των υδατικών αναγκών, τα υδραυλικά ύψη και την παροχή σχεδιασμού του κάθε πηγαδιού. Η επιτομή στην μέθοδο του αφορούσε τη γραμμικοποίηση του μη γραμμικού προβλήματος σε μη μόνιμη και ανεμπόδιστη ροή. Η τετραγωνικής μορφής σχέση ανάμεσα στα υδραυλικά ύψη επεκτάθηκε με μια γενικευμένη μορφή των σειρών Taylor. Η γραμμικοποίηση προσεγγίστηκε μέσω των συνεχόμενων επαναλήψεων. Η επαναληπτική διαδικασία χρησιμοποίησε την κατανομή των υψών από ένα γραμμικό προγραμματισμό και κάθε φορά οδηγούσε στον υπολογισμό του μητρώου απόκρισης. Επιλέγοντας μια κατάλληλη αρχική τιμή η βέλτιστη λύση βρισκόταν μετά από μόλις τέσσερις επαναλήψεις. Η μέθοδος απαιτούσε η υδροπερατότητα να μην είναι συνάρτηση του χρόνου και να εμπεριέχονται στο πρόβλημα ήπιες γραμμικότητες. Ακριβώς την ίδια φιλοσοφία χρησιμοποιεί και το διαχειριστικό μοντέλο της εν λόγω έρευνας για τη γραμμικοποίηση των ήπιων μη γραμμικών σχέσεων. Ιδιαίτερη ανάλυση θα δοθεί σε επόμενο κεφάλαιο που αφορά την παρουσίαση του γραμμικού μοντέλου.

Οι Peralta et. al. (1991) σύγκριναν τη μέθοδο της ενσωμάτωσης με αυτή του μοναδιαίου μητρώου απόκρισης σε ένα μεγάλο υποθετικό υπό πίεση υπόγειο υδροφορέα σε συνθήκες μόνιμης ροής. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης είχε στόχο

τη μεγιστοποίηση των αντλήσεων από τα τέσσερα πηγάδια, με περιορισμούς στα υδραυλικά ύψη και στις παροχές άντλησης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έδειξε πως η μέθοδος του μοναδιαίου μητρώου απόκρισης είναι προτιμότερη για ένα μεγάλο υδροφορέα, όταν το ποσοστό των κελιών των πηγαδιών είναι μικρότερο του 25% επί του συνόλου και το ποσοστό των κελιών για τα οποία υφίσταται περιορισμός στα υδραυλικά ύψη είναι αρκετά μικρό.

Οι Karatzas και Pinder (1993) χρησιμοποίησαν τη μέθοδο του μοναδιαίου μητρώου απόκρισης στην εργασία τους, στην οποία πρότειναν μια πολύ σημαντική μέθοδο για τη διαχείριση των υπόγειων υδατικών συστημάτων. Πρόκειται για την μέθοδο της εξωτερικής προσέγγισης. Προτάθηκε για την εύρεση του ολικού βέλτιστου μιας κοίλης αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία στόχο είχε την ελαχιστοποίηση του κόστους άντλησης (συμπεριλαμβανομένου και του κόστους εγκατάστασης) και την εύρεση της βέλτιστης θέσης των πηγαδιών για τον υπό πίεση υδροφορέα των Aguado και Remson (1980). Σε σύγκριση με το μικτό γραμμικό προγραμματισμό, έδωσε καλύτερα αποτελέσματα (7% διαφορά στη συνολική άντληση) και με πολύ μικρότερο υπολογιστικό χρόνο.

Ο Psilovikos (2006) επιλύοντας ένα γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης για το διασυνοριακό φρεάτιο υπόγειο υδροφορέα (Σκόπια-Ελλάδα) στην περιοχή του οικισμού Ειδομένη στο νομό Κιλκίς, κατάφερε μέσω μια εμπειρικής φόρμουλας να μειώσει τους συντελεστές του μητρώου απόκρισης. Η αντικειμενική συνάρτηση στόχευε στην ελαχιστοποίηση του κόστους άντλησης του υπόγειου ύδατος. Οι περιορισμοί αφορούσαν i) στα υδραυλικά ύψη σε οκτώ σημεία ελέγχου, στα οποία υπάρχουν γεωτρήσεις άντλησης, ii) στο συνολικό αντλούμενο όγκο υπόγειου ύδατος και iii) μέγιστο και ελάχιστο όριο στην παροχή άντλησης κάθε πηγαδιού. Το πρόβλημα είναι μη μόνιμο μιας και η περίοδος διαχείρισης ήταν ένας έτος με χρονικό βήμα ένα μήνα. Ο Psilovikos βρήκε πως υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στα μοναδιαία μητρώα κάθε χρονικού βήματος ίση με 5% με άμεση επίπτωση και στις σχέσεις των πτώσεων στάθμης με τις παροχές, οι οποίες απλοποιούνταν σημαντικά. Για να γίνουν αισθητές οι πτώσεις στάθμης (αποκρίσεις) από τις αντλήσεις του κάθε πηγαδιού (πιέσεις), η άντληση δεν ήταν μοναδιαία αλλά ίση με 1000 m³/d, μιας και ο υδροφορέας ήταν πραγματικός μεγάλων διαστάσεων. Το ίδιο ακριβώς ακολουθήθηκε και στην εν λόγω έρευνα όσον αφορά τις αντλήσεις των πηγαδιών, διότι η μοναδιαία απόκριση θα οδηγούσε σε πολύ μικρές έως και μηδαμινές πτώσεις όταν ο υπόγειος υδροφορέας της Κάρλας είναι 500 Km².

3.4. Στοχαστική βελτιστοποίηση

Σε προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε εκτενώς ο ρόλος της αβεβαιότητας στα προβλήματα προσομοίωσης των υπόγειων υδατικών συστημάτων και η αντιμετώπιση της μέσω της στοχαστικής προσομοίωσης. Η επίδραση της αβεβαιότητας της υδραυλικής αγωγιμότητας δεν σταματά όμως μόνο στην προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα, αλλά επηρεάζει εξίσου και τη διαχείριση. Εφόσον η διαχείριση αυτού στηρίζεται στη μέθοδο της προσομοίωσης-βελτιστοποίησης, γίνεται αμέσως αντιληπτό

πως και το πρόβλημα της βελτιστοποίησης επηρεάζεται άμεσα από την αβεβαιότητα. Στην εν λόγω εργασία, η έννοια της στοχαστικής βελτιστοποίησης στις μεθόδους προσομοίωσης-βελτιστοποίησης έγκειται στην στοχαστική αντιμετώπιση του μοντέλου προσομοίωσης. Με απλά λόγια, καλείται το πρόβλημα της βελτιστοποίησης, το οποίο προέκυψε από τους στόχους της βιώσιμης διαχείρισης του υπόγειου υδροφορέα, να επιλυθεί για κάθε μία από τις πολλαπλές ισοπίθανες πραγματώσεις, που η στοχαστική προσομοίωση παρήγαγε. Αυτό ακριβώς αποτελεί και τη συνεισφορά της θεωρίας της λήψης αποφάσεων, μέσω της μιας της μεθόδου, που είναι η βελτιστοποίηση, στη βέλτιστη διαχείριση υπό συνθήκες αβεβαιότητας.

Σύμφωνα με τους Wagner και Gorelick (1987), ένα από τα πιο δύσκολα θέματα στη διαχείριση των υπόγειων υδάτων είναι η επαρκής αντιμετώπιση της επίδρασης της αβεβαιότητας στην βέλτιστη λήψη απόφασης. Πρότειναν δε, πως η αβεβαιότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας πρέπει να ενσωματωθεί στη διαδικασία απόφασης ώστε να προκύψει μια στρατηγική για τη βέλτιστη διαχείριση ενός υπόγειου υδροφορέα. Επιπροσθέτως, οι Freeze και Gorelick (1999), διατύπωσαν πως η πιο εξελιγμένη χρήση της προσομοίωσης-βελτιστοποίησης πραγματοποιείται όταν η βελτιστοποίηση καλείται να επιλύσει τα αποτελέσματα της στοχαστικής προσομοίωσης, της οποίας οι παράμετροι που αντιμετωπίζονται στοχαστικά έχουν προηγουμένως εκτιμηθεί σωστά. Αυτό ακριβώς έχει συμβεί στη συγκεκριμένη έρευνα, μιας και η υδραυλική αγωγιμότητα, η οποία αντιμετωπίζεται στοχαστικά έχει ρυθμιστεί έναντι παρατηρούμενων τιμών υδραυλικών υψών.

Γενικά, έχουν εφαρμοστεί δύο προσεγγίσεις για τη στοχαστική διαχείριση των υπόγειων υδατικών συστημάτων με τη μέθοδο της προσομοίωσης-βελτιστοποίησης (Wagner και Gorelick, 1989). Προτάθηκαν αρχικά για προβλήματα της ποιότητας του υπόγειου ύδατος και επεκτάθηκαν σε αυτά που αφορούν την ποσότητα.

Στην πρώτη, η οποία καλείται πολλαπλή πραγμάτωση/απεικόνιση, επιλύεται ταυτόχρονα το πρόβλημα της προσομοίωσης-βελτιστοποίησης για ένα σετ από διαφορετικά σενάρια που αντιπροσωπεύουν την αβεβαιότητα και οι βέλτιστες λύσεις πρέπει να πληρούν όλους τους περιορισμούς. Αυτή η μέθοδος μπορεί να παρέχει αξιοπιστία πάνω από 90% βασιζόμενη ακόμη και σε μικρό αριθμό πραγματώσεων καθώς έδειξαν οι Wagner και Gorelick (1989), οι οποίοι χρησιμοποίησαν μόλις τριάντα πραγματώσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας σε ένα πρόβλημα αποκατάστασης υπόγειου υδροφορέα.

Ας υποθεθεί ένα γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης με στόχο τη μεγιστοποίηση της άντλησης και με περιορισμό στα υδραυλικά ύψη, τότε:

$$\max \bar{q} \quad (3.19)$$

$$f(\bar{q}) = h_i \leq h_i^* \quad \forall i \quad (3.20)$$

$$\bar{q} \geq 0$$

όπου \bar{q} το μητρώο των αντλήσεων και h_i^* οι περιορισμοί των υδραυλικών υψών. Στην προσέγγιση της πολλαπλής πραγμάτωσης, η μαθηματική αυτή έκφραση διατυπώνεται ως εξής:

$$\max \bar{q} \quad (3.21)$$

με περιορισμούς:

$$\begin{aligned} \text{Πραγμάτωση 1:} \quad & f_1(\bar{q}) = h_i(K_1) \leq h_i^* \quad \forall i \\ \text{Πραγμάτωση 2:} \quad & f_2(\bar{q}) = h_i(K_2) \leq h_i^* \quad \forall i \\ & \vdots \\ \text{Πραγμάτωση n:} \quad & f_n(\bar{q}) = h_i(K_n) \leq h_i^* \quad \forall i \end{aligned} \quad (3.22)$$

Όπου, το K αναπαριστά τις πραγματώσεις του στοχαστικού πεδίου τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας και n το πλήθος των πραγματώσεων. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης διατηρεί τον ίδιο αριθμό των μεταβλητών απόφασης, αλλά οι περιορισμοί στους οποίους πρέπει να υπακούει αυξάνονται κατά n . Η λύση του προβλήματος είναι εμπροσθοδρομική. Εφόσον έχουν παραχθεί οι εξαρτημένες n πραγματώσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας, καλείται το πρόβλημα της βελτιστοποίησης να επιλυθεί ταυτόχρονα για τις n πραγματώσεις αυτές. Επιπλέον, οι περιορισμοί πρέπει να ικανοποιηθούν για κάθε μία από τις n πραγματώσεις και η βέλτιστη λύση θα ικανοποιεί όλα τα υποπροβλήματα βελτιστοποίησης. Είναι σα να έχει σχεδιαστεί ένα βέλτιστο σενάριο διαχείρισης, το οποίο να ικανοποιεί n πραγματώσεις ταυτόχρονα. Η βέλτιστη λύση αυτή θα δίνει την παροχή για κάθε πηγάδι. Για να εκτιμηθεί σε βάθος η αβεβαιότητα απαιτείται ένας πολύ μεγάλος αριθμός πραγματώσεων n της υδραυλικής αγωγιμότητας. Το αποτέλεσμα θα ήταν το πλέον αξιόπιστο διαχειριστικό σενάριο, το οποίο θα ικανοποιούσε όλους τους περιορισμούς. Παρόλο αυτά, είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί αυτό. Οι Wagner και Gorelick (1989) έδειξαν πως τριάντα πραγματώσεις αρκούν, αφού θα ακολουθήσει εκ των υστέρων η Monte Carlo ανάλυση, για την οποία όπως αναφέρθηκε και πριν θα επιλυθεί το πρόβλημα της ροής του υπόγειου ύδατος. Σε αυτήν όμως την επίλυση μπορεί να λάβει χώρα ένας μεγάλος αριθμός πραγματώσεων, ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί αξιόπιστα η επίδραση της αβεβαιότητας της υδραυλικής αγωγιμότητας στο παραγόμενο πεδίο των υδραυλικών τιμών.

Η δεύτερη προσέγγιση, της οποίας το διαχειριστικό μοντέλο καλείται Monte Carlo, επιλύει το πρόβλημα της προσομοίωσης-βελτιστοποίησης ξεχωριστά για κάθε σενάριο που αντιπροσωπεύει την αβεβαιότητα, με το κάθε σενάριο να έχει τους δικούς του περιορισμούς. Εδώ, σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο, δεν απαιτείται η αντικειμενική συνάρτηση να υπόκεινται στους n περιορισμούς, αλλά προκύπτει μια βέλτιστη λύση/σενάριο για κάθε πραγμάτωση. Θεωρώντας κι εδώ το πρόβλημα των εξισώσεων 3.19 και 3.20, αυτό μέσω της Monte Carlo προσέγγισης διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Πραγμάτωση 1:} \quad \max \bar{q}_1 \quad (3.23)$$

$$f_1(\bar{q}_1) = h_i(K_1) \leq h_i^* \quad \forall i \quad (3.24)$$

$$\text{Πραγμάτωση 2:} \quad \max \bar{q}_2 \quad (3.25)$$

$$f_2(\bar{q}_2) = h_i(K_2) \leq h_i^* \quad \forall i \quad (3.26)$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$\text{Πραγμάτωση n:} \quad \max \bar{q}_n \quad (3.27)$$

$$f_n(\bar{q}_n) = h_i(K_n) \leq h_i^* \quad \forall i$$

Έτσι λοιπόν η διαδικασία αυτή θα δώσει ως λύση n βέλτιστους συνδυασμούς παροχών για τα πηγάδια ή αλλιώς n βέλτιστες στρατηγικές διαχείρισης. Εφόσον το πεδίο της υδραυλικής αγωγιμότητας θεωρείται τυχαίο, τότε και η λύση στο σύνολό της θεωρείται τυχαία. Κάθε μία από τις n βέλτιστες λύσεις αναπαριστά ένα τυχαίο δείγμα από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των βέλτιστων παροχών άντλησης. Για αυτόν τον λόγο και η μέθοδος αυτή είναι προτιμητέα όσον αφορά προβλήματα ποσότητας του υπόγειου ύδατος. Επιπροσθέτως, αν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης υπήρχε μόνο ένα πηγάδι άντλησης, τότε θα υπήρχε μία άμεση σχέση ανάμεσα στην παροχή άντλησης και στο επίπεδο αξιοπιστίας, δηλαδή η παροχή άντλησης, η οποία συνδέεται με το πεντηκοστό εκατοστημόριο της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των βέλτιστων παροχών θα ανταποκρίνεται σε ένα επίπεδο αξιοπιστίας 50%. Στην περίπτωση, όμως, στην οποία υπάρχουν παραπάνω από ένα πηγάδια, η παραπάνω σχέση δεν είναι σίγουρο αν θα ισχύσει.

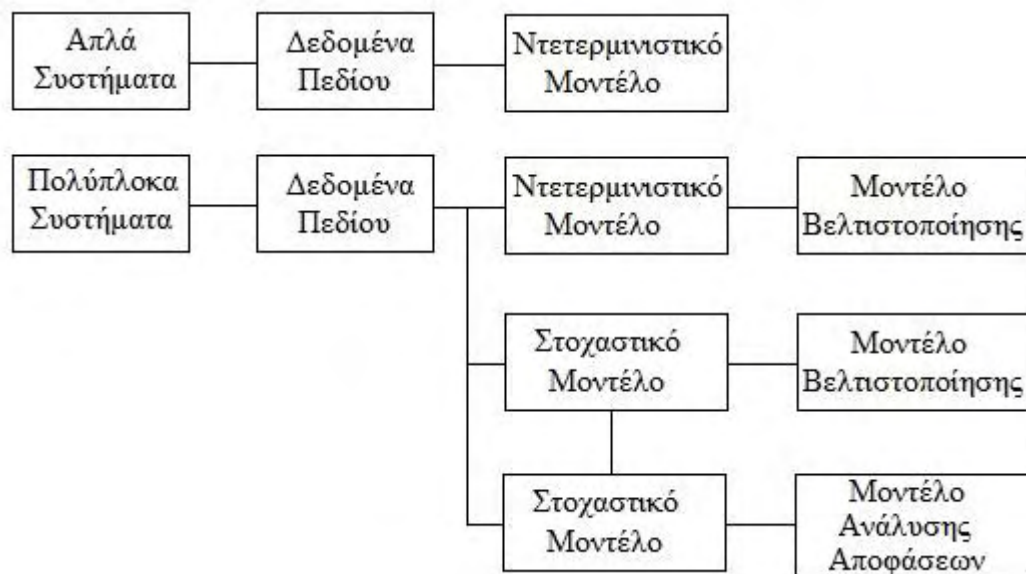
Βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις, που αναφέρονται σε θεωρητικά και πρακτικά προβλήματα της στοχαστικής βελτιστοποίησης σε υπόγεια υδατικά συστήματα μπορεί κάποιος να βρει στις εργασίες των Wagner (1995), Das και Datta (2001), Sahinidis (2004), Noetinger et. al. (2005), Tartakovsky (2013).

Στα προβλήματα υπόγειων υδατικών συστημάτων που αφορούν την ποσοτικής τους διαχείριση, σε αντίθεση με αυτά της ποιότητας, δεν εξετάζεται η επιτυχία ή αποτυχία τους, μέσω μιας εκ των υστέρων ανάλυση. Εφόσον ικανοποιηθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης, γίνεται αποδεκτή κάθε βέλτιστη στρατηγική διαχείρισης με θέσεις και παροχές πηγαιδίων για κάθε n πραγματώσεις. Και μάλιστα, για τις ανάγκες της αξίας της πληροφορίας, απαιτούνται τα αποτελέσματα όλων των πραγματώσεων, η σύγκριση των οποίων θα οδηγήσει σε σημαντικά συμπεράσματα για την επίδραση της αβεβαιότητας. Η τελική αξιολόγηση/σύγκριση των αποτελεσμάτων της στοχαστικής βελτιστοποίησης θα πραγματοποιηθεί για τους σκοπούς της αξίας της πληροφορίας, η οποία παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

3.5. Στοχαστική βελτιστοποίηση ή/και ανάλυση αποφάσεων?

Είναι, καταρχήν και οι δύο μέθοδοι κομμάτι της θεωρίας της λήψης αποφάσεων, με ευρύ φάσμα εφαρμογής σε αρκετές επιστήμες. Η ανάλυση των αποφάσεων έκανε τη θεωρητική της εμφάνιση στις επιστήμες στις αρχές του 20^{ου} αιώνα και εφαρμόστηκε σε προβλήματα διαχείρισης υπόγειων υδάτων για πρώτη φορά το 1990 (Freeze et al., 1990; Massmann et al., 1991). Είναι άρρηκτα δεμένη με τη στοχαστική προσομοίωση μιας και εφαρμόστηκε για αυτόν τον σκοπό όσον αφορά προβλήματα διαχείρισης υπόγειων υδατικών πόρων. Και αυτό γιατί τα προβλήματα διαχείρισης που δημιουργούνται και αντιμετωπίζονται μέσα σε αβέβαιο υδρογεωλογικό καθεστώς είναι αδύνατο να επιλυθούν στη γενική τους κλίμακα, με αποτέλεσμα να διαχωρίζονται σε μικρότερα προβλήματα, που επιλύονται πιο εύκολα και με περισσότερη λεπτομέρεια. Τα αποτελέσματα αυτής της επίλυσης συντίθενται έτσι ώστε να προσεγγισθεί η λύση του αρχικού προβλήματος. Η θεωρία των αποφάσεων δίνει τη δυνατότητα στο διαχειριστή να πάρει ορισμένες αποφάσεις σχετικές με την αποτελεσματικότητα και την απόδοση των εναλλακτικών στρατηγικών, για να επιλέξει ορισμένες από το σύνολο των δυνατών στρατηγικών, ώστε να επιτευχθεί η συνολική λύση του προβλήματος. Συνδέεται άρρηκτα με την ανάλυση επικινδυνότητας και έχει ευρέως εφαρμοστεί σε τέτοια θέματα. Στη συγκεκριμένη εργασία, η θεωρία των αποφάσεων καλείται να οδηγήσει το διαχειριστή σε εκείνη την στρατηγική που θα τον συμφέρει οικονομικά να πάρει το «ρίσκο» για την εξεύρεση νέας δειγματοληπτικής τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας από το πεδίο με σκοπό τη μείωση της αβεβαιότητας.

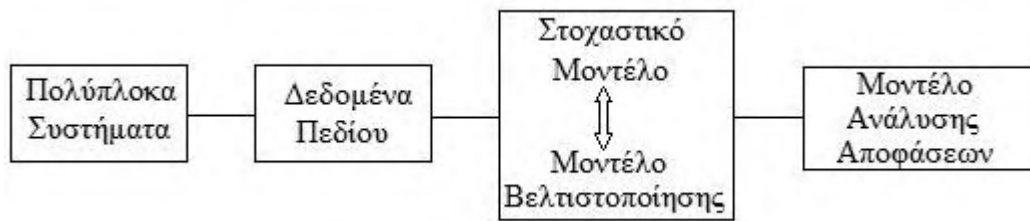
Οι Freeze και Gorelick (1999) περιέγραψαν πολύ αναλυτικά, μέσω παραδειγμάτων πάνω στην εξυγίανση υδροφορέων από ρυπαντές, τη χρησιμότητα των δύο μεθόδων και τις διαφορές του. Μία πρώτη διαφοροποίηση, ως προς τη φύση των μεθόδων, έγκειται στο ότι η βελτιστοποίηση είναι από τη φύση της ντετερμινιστική. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1980, η βελτιστοποίηση στηριζόμενη σε γραμμικό ή μη προγραμματισμό, χρησιμοποιήθηκε για ντετερμινιστικά προβλήματα υπόγειας ροής, τα οποία δε λάμβαναν υπόψη την αβεβαιότητα. Με την εξέλιξη της έρευνας σε αυτό τον τομέα, η βελτιστοποίηση έλαβε πλέον υπόψη της την αβεβαιότητα, μέσω της επίλυσης στοχαστικών μοντέλων προσομοίωσης πάλι ανακαλώντας είτε το γραμμικό είτε το μη γραμμικό προγραμματικό. Με άλλα λόγια, στην στοχαστική προσομοίωση οφείλεται ο χαρακτηρισμός που απέκτησε η βελτιστοποίηση, ως στοχαστική. Από την άλλη η ανάλυση αποφάσεων είναι από τη φύση της στοχαστική και για αυτό έχει εφαρμογή μόνο στη στοχαστική προσομοίωση.



Σχήμα 3. 5. Τέσσερα κλασικά πλαίσια σχεδιασμού (Freeze and Gorelick, 1999)

Σύμφωνα με τους (Freeze και Gorelick, 1999), τέσσερα είναι τα κλασικά πλαίσια σχεδιασμού για τη διαχείριση των υδατικών πόρων με τη χρήση κατάλληλων μοντέλων. Ανάλογα με τη φύση του προβλήματος που έχει ο διαχειριστής να επιλύσει, καταλήγει σε ένα από τα τέσσερα πλαίσια για να καταστρώσει τη στρατηγική διαχείρισής του.

Στη συγκεκριμένη έρευνα προτείνεται ένα πιο ολοκληρωμένο πλαίσιο διαχείρισης, το οποίο θα ικανοποιεί τους στόχους της διαχείρισης που τίθενται σε κάθε βήμα και στο οποίο επιστρατεύονται και θα συνυπάρχουν μαζί και η βελτιστοποίηση και η ανάλυση αποφάσεων. Η πρώτη σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη στοχαστική προσομοίωση, στοχεύει στην εύρεση της βέλτιστης λύσης (βέλτιστος αντλούμενος όγκος υπόγειου νερού, βέλτιστη θέση και βέλτιστος αριθμός πηγαδιών) για κάθε μία από τις πολλαπλές ισοπιθανές πραγματώσεις του υδροφορέα και πρόκειται για τη μέθοδο της «προσομοίωσης-βελτιστοποίησης» που εκτενώς αναλύθηκε προηγουμένως. Η δεύτερη επιστρατεύεται μέσω της αξίας της πληροφορίας, η οποία αποτελεί το τελευταίο στάδιο της ανάλυσης αποφάσεων και στοχεύει στην ποσοτικοποίηση, με οικονομικούς όρους, της αξίας που έχει η συλλογή από το πεδίο νέας τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας, με σκοπό τη μείωση της αβεβαιότητας. Η συμβολή ουσιαστικά της ανάλυσης των αποφάσεων, μέσω του τελευταίου σταδίου της, έγκειται στην ποσοτικοποίηση των βέλτιστων αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη μέθοδο της «προσομοίωσης-βελτιστοποίησης». Ο συνδυασμός τους πρωτοεμφανίστηκε στα προβλήματα εξυγίανσης των υπόγειων υδροφορέων από ρυπαντές, στις αρχές της δεκαετίας του '90, ενώ για προβλήματα που αφορούν την ποσοτική διαχείριση οι περιπτώσεις είναι ελάχιστες. Εκτενής παρουσίαση αυτών των εργασιών θα γίνει στο κεφάλαιο της αξίας της πληροφορίας.



Σχήμα 3. 6. Προτεινόμενο πλαίσιο σχεδιασμού της εν λόγω έρευνας

4. Η ΑΞΙΑ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

Επειδή η αξία της πληροφορίας στηρίζεται στην ανάλυση Bayes, είναι προτιμότερο πριν τη θεωρητική παρουσίαση της πρώτης, να προηγηθεί η παρουσίαση της δεύτερης. Η ανάλυση Bayes είναι αρκετά εκτενής και θα απαιτούνταν αρκετές σελίδες για την πλήρη ανάλυσή της. Εδώ θα παρουσιαστούν οι βασικές αρχές της, των οποίων κάνει χρήση η αξία της πληροφορίας.

4.1. Βασικές αρχές της ανάλυσης Bayes

Αρκετοί συγγραφείς διαχωρίζουν την αβεβαιότητα από την τυχαιότητα, σύμφωνα με τη λογική πως η αβεβαιότητα οφείλεται καθαρά στην έλλειψη της πληροφορίας και η οποία μπορεί να μειωθεί εάν περισσότερη πληροφορία είναι διαθέσιμη (Kundzewicz, 1995). Βασιζόμενη σε αυτήν τη λογική, επιστρατεύεται η ανάλυση Bayes για να ανανεώσει με επιπλέον πληροφορία την πρότερη εικόνα των δεδομένων, ώστε να επιτευχθεί η μείωση της αβεβαιότητας. Για την εν λόγω έρευνα παρέχει ένα γενικό πλαίσιο, στο οποίο έχει αναγνωρισθεί η αβεβαιότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας και εκτιμάται η επίδρασή της στη λήψη της απόφασης από το διαχειριστή ώστε να χαράξει τη στρατηγική συλλογής νέων τιμών της παραμέτρου αυτής από το πεδίο. Η επίδραση αυτή αποτιμάται με οικονομικούς όρους. Η μέθοδος του Bayes παρέχει ένα πλαίσιο με το οποίο εκτιμάται και ποσοτικοποιείται η επίδραση της αβεβαιότητας των παραμέτρων στην εκτίμηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Αποτελεί επίσης, την πιο σταθερή και σίγουρη μέθοδο για την εξαγωγή στατιστικών χαρακτηριστικών και την εκτίμηση της αβεβαιότητας για κάθε ανανέωση της λίστας των παραμέτρων του μοντέλου. Επιτρέπει την ενσωμάτωση της εξωτερικής πληροφορίας στην ανάλυση. Αυτή η πληροφορία χαρακτηρίζεται από μια εκ των προτέρων (a priori) κατανομή και συνδυάζεται με την υπάρχουσα πληροφορία για να δώσει μια εκ των υστέρων (a posteriori) κατανομή στην οποία στηρίζονται τα νέα αποτελέσματα του μοντέλου και τα οποία με τη σειρά τους μπορούν να επεξεργαστούν στατιστικά, ώστε να ποσοτικοποιηθεί η νέα αβεβαιότητα. Η σημαντική συνεισφορά αυτής της μεθόδου έγκειται στο ότι δίνει τη δυνατότητα στον ερευνητή να συγκρίνει την αβεβαιότητα των δύο καταστάσεων (prior, posterior) ώστε να αξιολογήσει τη συνεισφορά της νέας πληροφορίας.

Η φιλοσοφία πίσω από την ανάλυση Bayes είναι η εξής: *η μόνη ικανοποιητική περιγραφή της αβεβαιότητας επιτυγχάνεται μέσω της πιθανότητας*. Βασίζεται στην στατιστική συμπερασματολογία, αλλά τροποποιεί τις αρχές της ως εξής: υπάρχει η παράμετρος β , ο πληθυσμός της οποίας πρέπει να εκτιμηθεί, καθώς και η πιθανότητα $f(x|\beta)$, η οποία καθορίζει την πιθανότητα παρατήρησης διαφορετικών x , για διαφορετικές τιμές της β . Η θεμελιώδης διαφορά είναι πως το β χρησιμοποιείται σαν τυχαία ποσότητα, η οποία οδηγεί σε μία τελείως διαφορετική προσέγγιση σε σχέση με την κλασική στατιστική. Η συμπερασματολογία Bayes βασίζεται στην $f(\beta|x)$ και όχι

στην $f(x|\beta)$, δηλαδή στην πιθανότητα κατανομής της παραμέτρου β δεδομένης της x και όχι της x δεδομένης της παραμέτρου β . Για να πραγματοποιηθεί αυτό θα πρέπει πρώτα να καθορισθεί η «a priori» κατανομή (εκ των προτέρων κατανομή) $f(\beta)$, η οποία αναπαριστά την κατανομή της β , προτού ανακτηθεί οποιαδήποτε νέα πληροφορία για αυτήν.

Το θεώρημα Bayes για τυχαιές μεταβλητές με πυκνότητες που συμβολίζονται με f , παίρνει την εξής μορφή:

$$f(\beta | x) = \frac{f(\beta)f(x | \beta)}{\int f(\beta)f(x | \beta)d\beta} \quad (4.1)$$

Η μεταβλητή x μπορεί να είναι είτε διακριτή, είτε συνεχής, με τη μόνη διαφορά πως στη συνεχή περίπτωση η f είναι η “a-priori” συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και στη διακριτή περίπτωση η f είναι η συνάρτηση πιθανότητας του x . Αντίστοιχα, η παράμετρος β μπορεί να είναι συνεχής ή διακριτή, αλλά στη δεύτερη περίπτωση ο παρανομαστής της σχέσης μπορεί να γραφεί και $\sum f(\beta_j)f(x | \beta_j)$. Εφόσον έγινε ολοκλήρωση ως προς β , ο παρανομαστής της εξίσωσης 4.1 είναι συνάρτηση μόνο του x . Επομένως, για δεδομένες παρατηρήσεις x , ο παρανομαστής είναι σταθερά και καλείται σταθερά κανονικοποίησης. Άρα η εξίσωση 4.1 μπορεί εναλλακτικά και πιο απλά να διατυπωθεί ως εξής:

$$f(\beta | x) \propto f(\beta)f(x | \beta) \quad (4.2)$$

που σημαίνει πως η “a posteriori” κατανομή (εκ των υστέρων κατανομή) είναι ανάλογη της “a priori” κατανομής πολλαπλασιαζόμενης με τη συνάρτηση πιθανοφάνειας. Ακόμη και η $f(\beta|x)$ είναι συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και αυτό οφείλεται στη σταθερά κανονικοποίησης. Η ανάλυση Bayes στηρίζεται σε τέσσερα βασικά σημεία, τα οποία τη χαρακτηρίζουν και συνάμα την ξεχωρίζουν από την κλασική στατιστική:

1. A priori πληροφορία (εκ των προτέρων πληροφορία): Κάθε πρόβλημα είναι μοναδικό και έχει το δικό του περιεχόμενο. Από αυτό το περιεχόμενο εξάγονται οι a priori πληροφορίες.
2. Υποκειμενική πιθανότητα: Όλες οι πιθανότητες είναι υποκειμενικές και εξαρτώνται από την κρίση του λήπτη αποφάσεων που μπορεί να έχει για μια δεδομένη κατάσταση. Η συμπερασματολογία της βασίζεται στην a posteriori κατανομή $f(\beta|x)$, η οποία εξαρτάται από την a priori κατανομή $f(\beta)$, όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως.
3. Συνέπεια: αντιμετωπίζοντας την παράμετρο β ως τυχαία, όλη η ανάλυση Bayes εξαρτάται μόνο από τη θεωρία πιθανοτήτων. Αυτό σημαίνει πως όλα τα αποτελέσματα μπορούν να παρουσιαστούν με τη μορφή πιθανοτήτων για την παράμετρο β και μάλιστα μέσω της a priori κατανομής $f(\beta)$.
4. Μη προσκόλληση σε συνταγές: Η κλασική στατιστική δεν είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει όρους πιθανοτήτων για την παράμετρο β . Η ανάλυση Bayes έχει

ξεπεράσει αυτό το πρόβλημα με τη χρήση μιας σειράς κριτηρίων, τα οποία κρίνουν και συγκρίνουν τους εκτιμητές βασιζόμενα στην *a posteriori* κατανομή.

Τα βασικά βήματα της ανάλυσης είναι τα εξής:

- Επιλογή του κατάλληλου μοντέλου πιθανοφάνειας: Εξαρτάται από τη μεθοδολογία που θα επιλεγεί για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα, δηλαδή ποιο μοντέλο θα είναι το μοντέλο των δεδομένων. Η γνώση της δομής των δεδομένων βοηθά στην επιλογή του κατάλληλου μοντέλου, αλλά τις περισσότερες φορές γίνεται μια υπόθεση για την κατανομή του μοντέλου και η ισχύς αυτής της θεώρησης εκτιμάται αργότερα.
- Επιλογή της *a priori* κατανομής: Όπως παρουσιάστηκε και πριν αποτελεί βασικό κριτήριο για την ανάλυση και τα σημεία τα οποία πρέπει να προσεχθούν είναι:
 1. Η επιλογή της είναι καθαρά υποκειμενική και θα επηρεάσει την *a posteriori* κατανομή. Αυτή η ελευθερία στην επιλογή αποτελεί ταυτόχρονα και κίνδυνο διότι η μη κατάλληλη επιλογή της θα οδηγήσει όλη τη διαδικασία σε εσφαλμένα αποτελέσματα.
 2. Η συνεχής ανανέωση της *a priori* κατανομής έχει σαν αποτέλεσμα και τη μείωση της επιρροής της στο πρόβλημα. Αυτό αποτελεί και το κλειδί στη διαδικασία, ώστε να επιλέξει ο λήπτης απόφασης πότε θα την τερματίσει.
- Υπολογισμός: Απαιτείται ιδιαίτερη αντιμετώπιση στους μαθηματικούς υπολογισμούς διότι η παρουσία του ολοκληρώματος στην εξίσωση 3.28 την καθιστά δύσκολη ως προς την επίλυσή της. Με τη χρήση ορισμένων επιλογών των *a priori* κατανομών το ολοκλήρωμα μπορεί να παραλειφθεί.
- Συμπερασματολογία: Στην ανάλυση Bayes η συμπερασματολογία είναι πιο πλήρης διότι όλη η γνώση για την παράμετρο β , η οποία είναι διαθέσιμη από την *a priori* κατανομή και των δεδομένων, αντιπροσωπεύεται από την *a posteriori* κατανομή. Αυτό σημαίνει πως η $f(\beta|x)$ είναι η συμπερασματολογία.

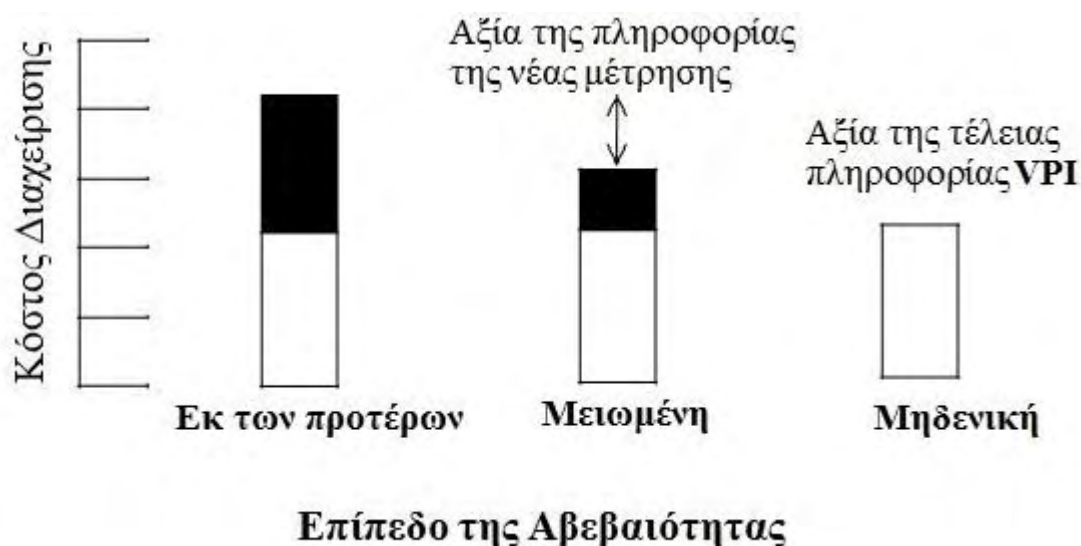
Η ανάλυση Bayes, έχει εφαρμοστεί σε πλήθος εργασιών που αφορούν προβλήματα διαχείρισης υπόγειων υδατικών συστημάτων και όχι μόνο για τις ανάγκες της αξίας της πληροφορίας. Η προσέγγισή της στις ανάγκες της αξίας της πληροφορίας θα παρουσιαστεί μέσα από εργασίες που θα παρουσιαστούν στο τέλος του κεφαλαίου.

4.2. Η έννοια της αξίας της πληροφορίας

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναφέρθηκε η επίδραση που έχει η αβεβαιότητα της έλλειψης επαρκών δεδομένων και της χωρικής μεταβλητότητας της υδραυλικής αγωγιμότητας τόσο στην προσομοίωση, όσο και στη διαχείριση των υπόγειων υδατικών συστημάτων. Επηρεάζει, λοιπόν, άμεσα τον διαχειριστή στη λήψη αποφάσεων για τη χάραξη της βιώσιμης, βέλτιστης και ολοκληρωμένης στρατηγικής διαχείρισης. Έχει ξεκαθαριστεί επίσης πως αυτή η αβεβαιότητα των δύο πηγών, είναι που αντιμετωπίζεται στην εν λόγω έρευνα. Η χωρική μεταβλητότητα είναι ένα μόνιμο

χαρακτηριστικό της γεωλογίας της περιοχής και η αντιμετώπισή της, μέσω της στοχαστικής διαδικασίας, επιτυγχάνεται με τη γεωστατιστική προσέγγιση. Εφόσον το γεωλογικό υπόβαθρο δεν αλλάζει και παραμένει ανομοιογενές, ο ερευνητής το βέλτιστο που μπορεί να πράξει είναι η πολύ καλή εκτίμηση των γεωστατιστικών εργαλείων που χαρακτηρίζουν τη μεταβλητότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας στο πεδίο. Όσο αφορά όμως τα δειγματοληπτικά δεδομένα, ο ερευνητής μπορεί με τη συλλογή νέων δειγματοληπτικών μετρήσεων της παραμέτρου, να οδηγηθεί σε μείωση της αβεβαιότητας. Αυτή η συνεισφορά της νέας δειγματοληπτικής μέτρησης/πληροφορίας αποτελεί και την αξία που αυτή συνεισφέρει στη λήψη αποφάσεων του διαχειριστή και όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω αποτιμάται και με οικονομικούς όρους.

Η αξία της πληροφορίας επεκτείνει την ανάλυση των αποφάσεων στο να εκτιμά τα οφέλη της συλλογής επιπλέον πληροφορίας ώστε να μειωθεί ή απαλειφθεί η αβεβαιότητα από μια συγκεκριμένη χάραξη στρατηγικής διαχείρισης (Yokota, 2004). Σύμφωνα με τον Wagner (1999), η ανάλυση της αξίας της πληροφορίας παρέχει ένα μέσο για την ποσοτικοποίηση της οικονομικής αξίας της συλλογής νέων δεδομένων από το πεδίο και την αναπαριστούν με ένα απλό γραφικό παράδειγμα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4. 1. Ανάλυση της αξίας της πληροφορίας για τρία επίπεδα αβεβαιότητας σε σχέση με το κέρδος διαχείρισης (Wagner, 1999)

Η αριστερή μπάρα αναπαριστά το κόστος της διαχείρισης για την αβεβαιότητα που οφείλεται στην εκ των προτέρων πληροφορία, δηλαδή στις ήδη υπάρχουσες δειγματοληπτικές τιμές, πριν να αρχίσει η συλλογή νέων τιμών. Το άνω, σκιασμένο όριο στις μπάρες αναπαριστά το κόστος της υπερδιαστασιολόγησης που οφείλεται στην αβεβαιότητα. Η μεσαία μπάρα αναπαριστά την περίπτωση στην οποία η αβεβαιότητα και άρα το κόστος της υπερδιαστασιολόγησης έχουν μειωθεί από τη λήψη νέων δειγματοληπτικών τιμών της παραμέτρου. Η μείωση του κόστους διαχείρισης ανάμεσα στην αριστερή μπάρα της εκ των προτέρων κατάστασης και στη μεσαία μπάρα αποτελεί την αξία της νέας μέτρησης. Η δεξιά μπάρα αναπαριστά την περίπτωση στην οποία δεν

υφίσταται αβεβαιότητα, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει και υπερδιαστασιολόγηση και με το κόστος διαχείρισης να είναι το ελάχιστο δυνατό. Η μείωση του κόστους διαχείρισης ανάμεσα στην εκ των προτέρων κατάσταση αβεβαιότητας και στη μηδενική καλείται αξία της τέλειας πληροφορίας. Τόσο η αξία της δειγματοληπτικής πληροφορίας, όσο και η αξία της τέλειας πληροφορίας είναι δείκτες κλειδιά για την ανάπτυξη της διαδικασίας. Η αξία της δειγματοληπτικής πληροφορίας είναι η οικονομική αποτίμηση της νέας υδρογεωλογικής πληροφορίας. Επιτρέπει στο διαχειριστή να γίνει αντιληπτό αν η στρατηγική της συλλογής νέας πληροφορίας είναι αποδεκτή. Για να γίνει αυτό πρέπει σε κάθε στάδιο λήψης νέας πληροφορίας, η αξία της δειγματοληπτικής πληροφορίας να είναι μεγαλύτερη από το κόστος που θα καταβάλλει ο διαχειριστής για να συλλέξει αυτήν τη νέα πληροφορία.

4.3. Η αξία της τέλειας πληροφορίας

Η πρώτη βασική υπόθεση, η οποία πρέπει να καθοριστεί, για να ξεκινήσει η διαδικασία της αξίας της πληροφορίας, είναι ο καθορισμός της τέλειας πληροφορίας. Εύκολα καταλαβαίνει κάποιος πως είναι η κατάσταση στην οποία ο ερευνητής έχει τέλεια εικόνα για τις δειγματοληπτικές τιμές της παραμέτρου. Έχει ένα τόσο μεγάλο αριθμό δειγματοληπτικών μετρήσεων, ο οποίος οδηγεί στην απουσία της αβεβαιότητας όσον αφορά τα δεδομένα, π.χ. να υπάρχει, το λιγότερο, μια δειγματοληπτική τιμή της παραμέτρου για κάθε κελί του καννάβου του μοντέλου προσομοίωσης. Επιπλέον αυτή η τέλεια πληροφορία της παραμέτρου μέσα στον χώρο οδηγεί τον ερευνητή και σε μια τέλεια γνώση της μεταβλητότητας της, μέσα στο πεδίο, εφόσον καταρτιστούν επιτυχώς τα κατάλληλα γεωστατιστικά εργαλεία. Άρα, η αξία της τέλειας πληροφορίας, απομακρύνει κάθε αβεβαιότητα, που οφείλεται στην έλλειψη επαρκών δεδομένων και στη χωρική μεταβλητότητα της παραμέτρου. Η κατάσταση αυτή δεν μπορεί απλά να είναι ιδεατή σε πραγματικά προβλήματα, αλλά καθορίζεται για τις ανάγκες της διαδικασίας, ώστε να καθορισθούν με βάση αυτή άλλων ειδών αξίες.

Η αξία της ισοδυναμεί με το μέγιστο χρηματικό ποσό, που ο λήπτης απόφασης επιθυμεί να πληρώσει για να αποκτήσει την τέλεια πληροφορία. Ισούται με τη διαφορά των αναμενόμενων κερδών υπό συνθήκες αβεβαιότητας και της αξίας της τέλειας πληροφορίας. Εάν όλες οι διαθέσιμες επιλογές για τη συλλογή πληροφορίας κοστίζουν περισσότερο από την αξία της τέλειας πληροφορίας τότε αυτές οι επιλογές απορρίπτονται. Και αυτό γιατί δε δύναται, η γνώση της μη τέλειας/μερικής πληροφορίας να κοστίζει πιο ακριβά από τη γνώση της τέλειας πληροφορίας.

Παρατίθεται ένα απλό παράδειγμα για την κατανόηση της αξίας της τέλειας πληροφορίας: Ένας επιχειρηματίας έχει κεφάλαιο 4000€ και θέλει να επενδύσει 100€, τα οποία μπορεί να χάσει, αν η επένδυση αποτύχει ή να τα κερδίζει με τους καρπούς που θα φέρει η επιτυχία της. Ο πίνακας απόφασης καταρτίζεται ως εξής:

	$\beta_{i=1}$: Ανατίμηση κεφαλαίου	$\beta_{i=2}$: Υποτίμηση Κεφαλαίου
$d_{j=1}$:Επένδυση	u_{11} :4100	u_{11} :3900
$d_{j=2}$:Διατήρηση στην τράπεζα	u_{21} :4000	u_{22} :4000
Πιθανότητες	p_1	p_2

, όπου β_1 είναι το επιτυχές αποτέλεσμα με την ανατίμηση του κεφαλαίου και β_2 το ανεπιτυχές με την υποτίμηση του κεφαλαίου. Το πρόβλημα, το οποίο ανακύπτει είναι το εξής: αν ο επιχειρηματίας ήξερε κατά κάποιο τρόπο με σιγουριά πως η επένδυση σου θα συμπεριφερόταν, πόσα χρήματα θα πλήρωνε για αυτή την τέλεια πληροφορία πριν την ανακτήσει? Υποτίθεται, πως έχει ένα σύμβουλο, τέλειο γνώστη των επενδύσεων, να τον συμβουλέψει. Πόσο κοστίζει, σε λογικά πλαίσια, η πληρωμή του? Η αξία της συμβουλής εξαρτάται από την πιθανότητα η επένδυση να επιτύχει, μιας και αν ο επιχειρηματίας ήταν σίγουρος δε θα χρειαζόταν τον σύμβουλο. Έστω λοιπόν πως οι πιθανότητες επιτυχίας-αποτυχίας είναι στο μισό, δηλαδή $p(\beta_1)=p(\beta_2)=0.5=50\%$. Η πληρωμή του συμβούλου πρέπει να γίνει πριν αυτός την αναπτύξει στον επιχειρηματία. Η αξία της τέλειας πληροφορίας μπορεί να εκτιμηθεί μέσα από δύο ανεξάρτητα συμβάντα: αν βγει αληθής η κατάσταση β_1 , τότε η καλύτερη απόφαση είναι η d_1 με τον επιχειρηματία να έχει κέρδος 4100€, ενώ αν βγει αληθής η κατάσταση β_2 , τότε η καλύτερη απόφαση είναι η d_2 , με τον επιχειρηματία να έχει 4000€. Επομένως, η αξία της τέλειας πληροφορίας στην πρώτη περίπτωση θα είναι 100€, ενώ στη δεύτερη 0€. Κανείς, όμως, δε μπορεί να προβλέψει ποια από τις δύο καταστάσεις θα επικρατήσει, την ώρα μάλιστα που θα πληρωθεί ο σύμβουλος. Για αυτό και στην πράξη εκτιμάται η αναμενόμενη της αξία. Αυτό το οποίο είναι γνωστό είναι οι πιθανότητες πραγμάτωσής τους. Ο στόχος είναι να ευδοκιμήσει η κατάσταση β_1 , η οποία θα αποφέρει κέρδη. Έτσι, το αναμενόμενο αποτέλεσμα που θα αποφέρει η τέλεια πληροφορία θα είναι:

$$\sum_{j=1}^n \max_i u_{ij} p_j = u_{11} * p_1 + u_{21} * p_2 = 4100 * 0.5 + 4000 * 0.5 = 4050€ \quad (4.3)$$

Από τις αποφάσεις d_j , αυτή η οποία οδηγεί σε μεγαλύτερο ποσό είναι η d_1 , άρα:

$$\max_i \sum_{j=1}^n u_{ij} p_j = u_{11} * p_1 + u_{11} * p_2 = 4100 * 0.5 + 3900 * 0.5 = 4000€ \quad (4.4)$$

Η διαφορά τους είναι η αναμενόμενη αξία της τέλειας πληροφορίας και ισούται με:

$$\sum_{j=1}^n \max_i u_{ij} p_j - \max_i \sum_{j=1}^n u_{ij} p_j = 50€ \quad (4.5)$$

Εφόσον το κεφάλαιο είναι 4000€, τότε η αναμενόμενη αξία της τέλειας πληροφορίας ισούται με τη διαφορά των άνω ποσών, δηλαδή 50€. Η ποσότητα,

$\sum_{j=1}^n \max_i u_{ij} p_j$ καλείται το αναμενόμενο όφελος της τέλειας πληροφορίας και η ποσότητα $\max_i \sum_{j=1}^n u_{ij} p_j$ καλείται το αναμενόμενο όφελος της εκ των προτέρων πληροφορίας.

Στην εν λόγω έρευνα, το ρίσκο που έχει να αντιμετωπίσει ο διαχειριστής αφορά στην επένδυση που προτίθεται να κάνει για να λάβει νέες δειγματοληπτικές μετρήσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας, άρα νέα πληροφορία. Τα νέα δεδομένα αναμένεται να μειώσουν την παραμετρική αβεβαιότητα, άρα και την αβεβαιότητα ως προς τα εκτιμώμενα υδραυλικά ύψη, επομένως και ως προς το διαθέσιμο-ανανεώσιμο υπόγειο νερό που μπορεί να αντλήσει και το οποίο θα του αποφέρει κέρδη από την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών της περιοχής.

4.4. Αξία της μερικής πληροφορίας

Ανταποκρίνεται στη μειωμένη κατάσταση αβεβαιότητας του σχήματος 4.1. Αυτή η γενική έννοια, στα προβλήματα διαχείρισης των υπόγειων υδατικών συστημάτων, καλείται εξειδικευμένα ως η αξία της δειγματοληπτικής πληροφορίας ή της νέας πληροφορίας ή της νέας μέτρησης. Για να εκτιμηθεί η αξία της, η οποία προηγουμένως παρουσιάστηκε γραφικά, απαιτείται η χρήση της ανάλυσης Bayes και για αυτόν τον λόγο παρουσιάστηκε στην αρχή του κεφαλαίου. Η συμβολή της έγκειται στην ανανέωση των πιθανοτήτων με τη λήψη της νέας πληροφορίας/μέτρησης, η οποία να μην δεν είναι η τέλεια, ώστε να εξαλείψει την αβεβαιότητα, αλλά οδηγεί σε μείωση αυτής. Με το που γίνει η λήψη της νέας μέτρησης, σύμφωνα με την ανάλυση Bayes, η διαδικασία της αξίας της πληροφορίας περνά από την εκ των προτέρων (prior) κατάσταση στην εκ των υστέρων (posterior) κατάσταση.

Έστω στο προηγούμενο απλό πρόβλημα, η νέα πληροφορία την οποία παρέχει ο σύμβουλος καλείται X . Η τιμή αυτή θα συσχετισθεί με τα αβέβαια γεγονότα β_j , υποθέτοντας τις πιθανότητες $p(X | \beta_j)$ γνωστές, δηλαδή είναι γνωστή η πιθανότητα συγκέντρωσης των δεδομένων εκείνων για τα οποία τα β_j θα πραγματοποιηθούν. Σύμφωνα με την ανάλυση Bayes, η $p(X | \beta_j)$ καλείται ως συνάρτηση πιθανοφάνειας. Με τη λήψη λοιπόν της νέας πληροφορίας θα ανανεωθούν οι προγενέστερες πιθανότητες $p(\beta_j)$ των γεγονότων β_j σε $p(\beta_j | X)$, σύμφωνα με τη σχέση:

$$p(\beta_j | X) = p(X | \beta_j) p(\beta_j) / p(X) \quad (4.6)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, οι προγενέστερες πιθανότητες τροποποιούνται σε εκ των υστέρων πιθανότητες με τον πολλαπλασιασμό με τη συνάρτηση πιθανοφάνειας

και διαιρώντας με την $p(X)$. Η νέα πληροφορία/μέτρηση X , είναι ακόμη άγνωστη και αντιμετωπίζεται πιθανολογικά. Ο επιχειρηματίας/λήπτης απόφασης, έχοντας τις νέες πιθανότητες για τα αβέβαια γεγονότα β_j , το βέλτιστο που μπορεί να πράξει είναι να μεγιστοποιήσει την εκ των υστέρων αναμενόμενη κατάσταση μέσω της έκφρασης:

$$\max_i \sum_{j=1}^n u_{ij} p(\beta_j | X) \quad (4.7)$$

Όπως και στην περίπτωση της τέλει πληροφορίας, στην οποία ο λήπτης απόφασης δεν ήξερε το είδος της πληροφορίας, έτσι και σε αυτήν την περίπτωση δεν γνωρίζει τι δεδομένα θα προκύψουν. Παρόλο αυτά, έχει τις πιθανότητες για αυτό. Γνωρίζει τις πιθανότητες $p(\beta_j)$ των αβέβαιων γεγονότων β_j και γνωρίζει και την πιθανότητα της X για κάθε γεγονός $p(X | \beta_j)$. Επομένως:

$$p(X) = \sum p(X | \beta_j) p(\beta_j) \quad (4.8)$$

Ο λήπτης απόφασης θα χρησιμοποιήσει την εξίσωση 4.7, πολλαπλασιάζοντάς την με $p(X)$ και προσθέτοντας όλες τις πιθανές μορφές που η μέτρηση X μπορεί να λάβει, για να λάβει την αναμενόμενη τιμή της μερικής πληροφορίας:

$$\sum_X \max_i \sum_{j=1}^n u_{ij} p(\beta_j | X) p(X) \quad (4.9)$$

Αλλά από την εξίσωση 4.6 ισχύει ότι:

$$p(\beta_j | X) p(X) = p(X | \beta_j) p(\beta_j) \quad (4.10)$$

οπότε η τελική της έκφραση θα ισούται με:

$$\sum_X \max_i \sum_{j=1}^n u_{ij} p(X | \beta_j) p(\beta_j) \quad (4.11)$$

ενώ, η αντίστοιχη αναμενόμενη τιμή για την εκ των προτέρων κατάσταση (πριν την κτήση της νέας πληροφορίας/μέτρησης X) ισούται με:

$$\max_i \sum_{j=1}^n u_{ij} p(\beta_j) \quad (4.12)$$

Η διαφορά των δύο προηγούμενων αναμενόμενων τιμών δίνει την αναμενόμενη αξία της μερικής πληροφορίας ή καλύτερα την αναμενόμενη αξία της νέας μέτρησης και είναι:

$$\sum_X \max_i \sum_{j=1}^n u_{ij} p(\beta_j | X) p(\beta_j) - \max_i \sum_{j=1}^n u_{ij} p(\beta_j) \quad (4.13)$$

Συνεχίζοντας, λοιπόν το προηγούμενο απλό παράδειγμα με τον επιχειρηματία, στην περίπτωση της μερικής πληροφορίας, όπου και ανταποκρίνεται πλέον στην πραγματικότητα, ο σύμβουλος θα του παρείχε τη νέα πληροφορία X . Αναζητείται η

αξία αυτής της πληροφορίας X . Εφόσον όμως δεν είναι τέλεια, το σίγουρο είναι πως δεν θα ισούται η αναμενόμενη της τιμή με την αντίστοιχη της τέλει πληροφορίας, η οποία υπολογίστηκε στα 50€. Ο λήπτης απόφασης έχει δύο επιλογές: να αγοράσει τη συμβουλή, με τη λογική ότι το κεφάλαιο θα ανατιμηθεί (συμβάν β_1) ή να μην την αγοράσει με τη λογική πως θα αποτύχει. Στην απλή αυτή περίπτωση η X μπορεί να λάβει δύο ειδών δεδομένα: X_1 : να αγορασθεί και X_2 : να μην αγορασθεί. Κατασκευάζεται λοιπόν ο πίνακας απόφασης, όπου $p(X_1 | \beta_1)$ θεωρείται η πιθανότητα ο λήπτης απόφασης να αγοράσει τη συμβουλή και αυτή να επιτύχει, άρα μια σωστή απόφαση, όπως επίσης από σωστή απόφαση προέρχεται και η $p(X_2 | \beta_2)$, για την οποία πήρε την απόφαση να μην την αγοράσει και του βγήκε σε καλό, διατηρώντας το κεφάλαιό του. Οι υπόλοιπες δύο πιθανότητες $p(X_1 | \beta_2)$ και $p(X_2 | \beta_1)$, προέρχονται από εσφαλμένες αποφάσεις. Ας υποθεθεί πως ο σύμβουλος είναι αξιόπιστος με την πιθανότητα της επιτυχίας στα $\frac{3}{4}$, δηλαδή: $p(X_1 | \beta_1) = p(X_2 | \beta_2) = \frac{3}{4}$, οπότε $p(X_2 | \beta_1) = p(X_2 | \beta_1) = \frac{1}{4}$.

	$\beta_{i=1}$	$\beta_{i=2}$	X_1	X_2
$d_{j=1}$	$u_{11}:4100$	$u_{11}:3900$	2025	1975
$d_{j=2}$	$u_{21}:4000$	$u_{22}:4000$	2000	2000
$p(\beta_j)$	$p_1=1/2$	$p_2=1/2$		
$p(X_i \beta_j)$	$3/4$	$1/4$		
$P(X_2 \beta_j)$	$1/4$	$3/4$		

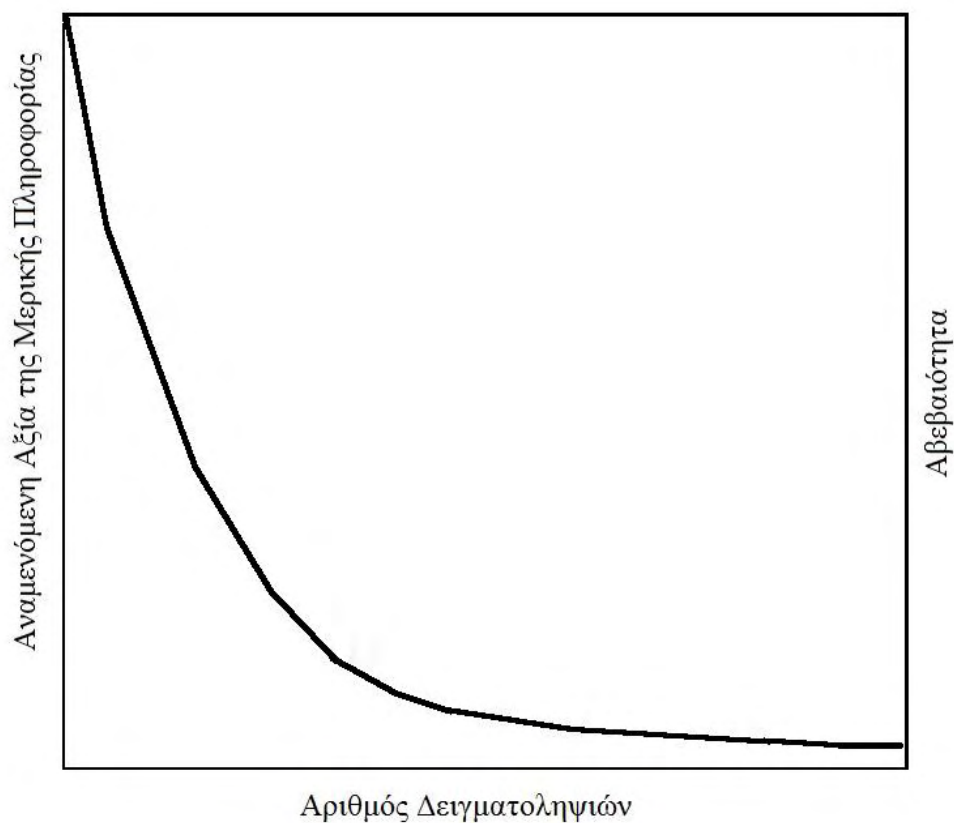
Κάτω από τις προγενέστερες πιθανότητες βρίσκονται οι συναρτήσεις πιθανοφάνειας των τιμών X_1, X_2 . Για κάθε απόφαση d_i και αποτέλεσμα X , υπολογίζεται η ποσότητα:

$$\sum_{j=1}^n u_{ij} p(X | \beta_j) p(\beta_j) \quad (4.14)$$

Η εξίσωση 4.11 στο συγκεκριμένο πρόβλημα ισούται με 4025€. Χωρίς να ληφθεί υπόψη η νέα πληροφορία, η αναμενόμενη τιμή είναι 4000€, η οποία προέρχεται από την εξίσωση 4.12. Η διαφορά τους λοιπόν, η οποία δίνεται από την εξίσωση 4.13 είναι η αναμενόμενη αξία της νέας μερικής πληροφορίας/μέτρησης και ισούται με 25€.

Το ερώτημα που τίθεται για την περαιτέρω λήψη και άλλης πληροφορίας/μέτρησης, είναι μέχρι ποια μέτρηση/πληροφορία συμφέρει τον λήπτη απόφασης να λάβει. Το ερώτημα είναι κρίσιμο, μιας και καθορίζει τα βήματα της διαδικασίας της αξίας της πληροφορίας. Η διαδικασία αυτή επιλέχθηκε για να προστατέψει τον λήπτη απόφασης από σπατάλη χρημάτων, όπως π.χ. στον υπερσχεδιασμό του σχήματος 4.1, με το να μειώσει την αβεβαιότητα στη διαχείριση του συστήματος, αλλά αυτό δεν μπορεί να φτάσει και στο άλλο άκρο, το οποίο και αυτό είναι ασύμφορο, όπου θα συλλέγει συνέχεια μετρήσεις με αποτέλεσμα το κόστος αυτό να είναι μεγαλύτερο από τα οφέλη που θα του αποφέρει. Εδώ ακριβώς βρίσκεται και η απάντηση. Η διαδικασία της λήψης νέας πληροφορίας/μέτρησης θα σταματήσει όταν αυτή δεν είναι συμφέρουσα, όταν

δηλαδή η εκτιμώμενη αξία της νέας πληροφορίας/μέτρησης είναι μεγαλύτερη από τα κέρδη που αυτή θα αποφέρει. Έχει αποδειχθεί από προηγούμενες εφαρμογές πως η συνεισφορά της νέας πληροφορίας/μέτρησης μειώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των λήψεων (Lindley, 1985).



Σχήμα 4. 2. Σχέση της αναμενόμενης αξίας της μερικής πληροφορίας και της αβεβαιότητας με τον αριθμό δειγματοληψιών

Η θεωρία, η οποία παρουσιάστηκε είναι αρκετά γενική. Πλήθος ερευνητικών κλάδων έχει εφαρμόσει τις αρχές της σε προβλήματά τους. Στα προβλήματα διαχείρισης υδατικών πόρων και δη υπόγειων έχει εφαρμοστεί σε προβλήματα απορρύπανσης. Με την παρουσίαση λοιπόν σημαντικών εργασιών παρουσιάζεται και η προσέγγιση της γενικής θεωρίας της αξίας της πληροφορίας στα προβλήματα διαχείρισης υπόγειων υδατικών συστημάτων.

4.5. Η αξία της πληροφορίας στα προβλήματα διαχείρισης υπόγειων υδατικών συστημάτων

Οι θεωρητικές βάσεις της αξίας της πληροφορίας προέρχονται από τις επιστήμες των οικονομικών, των υπολογιστών και της μηχανικής (McCarthy, 1956; Howard, 1966; Gould, 1974). Στις αρχές της δεκαετίας του '70 υπήρχαν τρεις ομάδες ερευνητών, οι οποίες εισήγαγαν την αξία της πληροφορίας στις επιστήμες της υδρολογίας και της υδρογεωλογίας. Οι ομάδες αυτές ηγούνταν από τον Baecher του MIT (Baecher, 1972),

τον Maddock του Harvard (Maddock, 1973) και τους Davis και Kisiel από την Arizona (Davis and Dvoranchik, 1971).

Η πρώτη όμως εργασία, στην υδρογεωλογία, η οποία ανέπτυξε την αξία της πληροφορίας, βασισμένη στην ανάλυση Bayes, είναι των Gates και Kisiel (1974). Η αξία της πληροφορίας δεν αποτιμήθηκε όμως με οικονομικούς όρους και αυτό έγινε σαφές από τους συγγραφείς. Μελέτησαν τον υπόγειο υδροφορέα της λεκάνης Tucson, στην Arizona. Παρουσίασαν μια μεθοδολογία για να μελετήσουν την επίδραση των σφαλμάτων σε βασικά δεδομένα στα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης και για να εκτιμήσουν την αξία της επιπλέον πληροφορίας. Τα σφάλματα των βασικών δεδομένων καθορίστηκαν ως η διαφορά ανάμεσα στις προσομοιωμένες και τις παρατηρούμενες τιμές των μεταβλητών των μοντέλων. Το μέγεθος της αβεβαιότητας στα αποτελέσματα του μοντέλου μετρήθηκε από το αναμενόμενο σφάλμα στα προσομοιωμένα υδραυλικά ύψη σε σχέση με κάποια σφάλματα των μεταβλητών του μοντέλου. Υποθετικές μετρήσεις και η μείωση που αυτές προκαλούν στην αβεβαιότητα λήφθηκαν υπόψη για να ληφθούν επιπλέον μετρήσεις. Η διαδικασία αυτή απαιτεί γνώση της πρότερης κατανομής των μεταβλητών και κάνει εκτενή χρήση της θεωρίας απόφασης. Ένα μοντέλο διαφορικών εξισώσεων χρησιμοποιήθηκε. Η διαπερατότητα, ο συντελεστής αποθήκευσης, η εκροή, η κατείσδυση και οι αρχικές συνθήκες ήταν οι υπό εξέταση μεταβλητές. Εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων, υποτέθηκε η πρότερη κατανομή των μεταβλητών. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η επιπλέον συνεισφορά των δεδομένων των αρχικών συνθηκών και του συντελεστή αποθήκευσης είναι μικρή στη βελτίωση του μοντέλου σε αντίθεση με αυτή της διαπερατότητας.

Ακολούθησαν εργασίες, σε διάφορα προβλήματα υδρογεωλογίας, που αποτιμούσαν την αξία της πληροφορίας με οικονομικούς όρους (Bredehoeft and Young, 1983; Feinerman et al., 1985; Grosser and Goodman, 1985; Ben-Zvi et al., 1988; Marin et al., 1989; Medina et al., 1989; Reichard and Evans, 1989; Borisova et al., 2005). Παρόλο που πολλές από αυτές τις εργασίες κοστολογούσαν τη λήψη νέας μέτρησης δεν εστίαζαν στην εύρεση της βέλτιστης θέσης δειγματοληψίας αυτής. Αυτό ήταν και το επόμενο βήμα σε μεταγενέστερες εργασίες της αξίας της πληροφορίας, με την υδραυλική αγωγιμότητα να κερδίζει ολοένα και περισσότερο το ενδιαφέρον των ερευνητών (Rouhani, 1985; James and Freeze, 1993; James and Gorelick, 1994; Abbaspour et al., 1996; James et al., 1996; Norberg and Rosen, 2006; Dausman et al., 2010; Rojas et al., 2010). Μάλιστα οι James et al. (1996) και Rojas et al. (2010) σύγκριναν την αξία της πληροφορίας της υδραυλικής αγωγιμότητας, των υδραυλικών υψών και της συγκέντρωσης του ρύπου, τόσο στη μείωση της αβεβαιότητας, όσο και με οικονομικούς όρους, και κατέληξαν πως η υδραυλική αγωγιμότητα είναι αυτή με την μεγαλύτερη αξία της πληροφορίας. Τέλος, από τις αρχές της δεκαετίας του '90 εμφανίστηκαν εργασίες της αξίας της πληροφορίας, οι οποίες έκαναν χρήση της προσομοίωσης-βελτιστοποίησης (Wagner et al., 1992; Wagner, 1999; Feyen and Gorelick, 2005; Bau and Mayer, 2007; Ma and Chang, 2008; Liu et al., 2012), όπως στην εν λόγω έρευνα. Η αξία της πληροφορίας, σε αυτές τις εργασίες, στηρίζεται σε βέλτιστες λύσεις μιας στρατηγικής διαχείρισης και πάνω σε αυτές αποτιμά τη συνεισφορά της νέας πληροφορίας, με τα οφέλη που αυτή προσφέρει. Αυτή ακριβώς η μεθοδολογία είναι που

παρουσιάστηκε και στο Υποκεφάλαιο 3.4 «Στοχαστική βελτιστοποίηση ή/και ανάλυση αποφάσεων?» Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζεται ένας πίνακας με τις εργασίες, που λήφθηκαν υπόψη για την εν λόγω έρευνα, πάνω στην αξία της πληροφορίας στην υδρογεωλογία. Επιλέχθηκαν πέντε κατηγορίες, ως προς τον χαρακτηρισμό τους, από τις οποίες οι τέσσερις (οικονομική αποτίμηση, εύρεση θέσης δειγματοληψίας νέας πληροφορίας, υδραυλική αγωγιμότητα ως η υπό εξέταση παράμετρος και βελτιστοποίηση) αφορούν τα βασικά στοιχεία της εν λόγω έρευνας πάνω στην διαδικασία της αξίας της πληροφορίας και η πέμπτη (πρόβλημα ρύπανσης) για να γίνει αντιληπτό στον αναγνώστη πως είναι ελάχιστες οι εργασίες της διαχείρισης της ποσότητας του υπόγειου ύδατος, οι οποίες έχουν αντιμετωπιστεί με τη μέθοδο της αξίας της πληροφορίας. Ο πίνακας αυτός παρουσιάζει πως με την πάροδο του χρόνου, οι εργασίες γινόντουσαν όλο και πιο πλήρεις, ως προς τα βασικά στοιχεία που αντιμετωπίζαν.

Οι Freeze et al., (1992) ήταν από τους πρώτους που πρότειναν την τριών καταστάσεων ανάλυση Bayes. Στόχος της διαχείρισης ήταν η μείωση του κόστους που απαιτούνταν για την εξυγίανση ενός υποθετικού υπόγειου υδροφορέα δύο στρωμάτων. Η παράμετρος για την οποία εξετάσθηκε η αξία της πληροφορίας ήταν η υδραυλική αγωγιμότητα. Η πληροφορία που τους ενδιέφερε ήταν αν υπήρχε επικοινωνία των δύο στρωμάτων, διότι αν ίσχυε αυτό ο ρυπαντής θα οδηγούνταν και στο κατώτερο στρώμα. Η υδραυλική αγωγιμότητα επιλέχθηκε ως η παράμετρος που θα τους έδινε μια τέτοια εικόνα και με τη γεωστατιστική προσέγγιση (Kriging) προσομοίωσαν τη χωρική μεταβλητότητά της. Όπως οι ίδιοι παραθέτουν στην περίληψη της εργασίας η αξία της πληροφορίας επιλέχθηκε για: i) τη μείωση της αβεβαιότητας ως προς την παρουσία ασυνέχειας του διαπεράστου στρώματος πους ξεχώριζε τα δύο στρώματα του υδροφορέα και ii) τη μείωση της αβεβαιότητας της κατανομής της υδραυλικής αγωγιμότητας. Η αξία της νέας πληροφορίας/μέτρησης θεωρήθηκε ως η μείωση που επιφέρει κάθε μέτρηση στην αντικειμενική συνάρτηση σε σχέση με την προηγούμενη. Δεν εφαρμόσαν όμως καμία στρατηγική συλλογής της νέας μέτρησης, απλά έκαναν τυχαίες δειγματοληψίες σαρώνοντας το πεδίο μελέτης. Αυτό δεν μπορούσαν να το αποφύγουν, διότι πρώτο μέλημά τους ήταν η εύρεση ασυνέχειας του διαπεράστου στρώματος. Έκαναν όμως, χρήση των τριών καταστάσεων ανανέωσης της ανάλυσης Bayes, κάτι το οποίο ήταν πρωτοπόρο για την εποχή εκείνη. Η ανάλυση Bayes προσεγγίζεται μέσω δύο καταστάσεων: της εκ των προτέρων (a priori/prior) και της εκ των υστέρων (a posteriori/posterior), όπως παρουσιάστηκε στην αρχή του κεφαλαίου. Η νέα αντίληψη της χρήσης τριών καταστάσεων θεωρεί και μια ενδιάμεση κατάσταση την προ εκ των υστέρων (preposterior), η οποία στηρίζεται στην εξής φιλοσοφία: πριν τη λήψη της δειγματοληπτικής μέτρησης της νέας τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας, λαμβάνεται υπόψη η προσομοιωμένη τιμή αυτής, όπως προέκυψε από το μοντέλο χωρικής παρεμβολής και εξετάζεται η συνεισφορά της, δηλαδή η αξία της. Αυτό προϋποθέτει να έχει δομηθεί και εκτελεσθεί σωστά το μοντέλο χωρικής παρεμβολής και για αυτόν τον λόγο γίνεται η χρήση της εξαρτημένης προσομοίωσης. Εφόσον λοιπόν γίνει η λήψη αυτής της προσομοιωμένης τιμής αναθεωρείται, στη συγκεκριμένη εργασία, η αντικειμενική συνάρτηση για να διαπιστωθεί αν η νέα μέτρηση είναι άξια

λήψης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη σύγκριση της μείωσης του κόστους που προσφέρει η νέα τιμή και του κόστους που καταβάλει ο διαχειριστής για να τη λάβει. Αν η πρώτη είναι μεγαλύτερη από τη δεύτερη, τότε μπορεί να ρισκάρει ο διαχειριστής να οδηγηθεί προς τη λήψη της πραγματικής δειγματοληπτικής νέας τιμής. Χρησιμοποιήθηκε η λέξη «ρισκάρει», διότι η προσομοιωμένη τιμή είναι μια προσέγγιση της πραγματικής και περικλείει ένα ποσοστό απόκλισης από την πραγματική. Για τον λόγο αυτό προηγουμένως έγινε αναφορά στη σωστή δόμηση και εκτέλεση του μοντέλου χωρικής μεταβλητότητας. Για τη χρήση της προσομοιωμένης νέας τιμής, οι συγγραφείς αναφέρουν μια διαδικασία κλειδί: Η προσομοιωμένη τιμή που λαμβάνεται στην προ εκ των υστέρων κατάσταση, ανανεώνει μόνο την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της παραμέτρου, ώστε να παραχθούν νέες ισοπίθανες στοχαστικές απεικονίσεις αυτής. Δεν επηρεάζει το μοντέλο χωρικής μεταβλητότητας, ώστε να απαιτείται ανανέωση/επίλυση αυτού. Το τελευταίο γίνεται μόνο όταν ληφθεί η πραγματική νέα τιμή. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η χρήση της αξίας της πληροφορίας αποδεικνύεται ένα απαραίτητο εργαλείο για τη διαχείριση των υπόγειων υδατικών συστημάτων, ειδικά σε περιπτώσεις εξυγίανσης αυτών, μιας και μειώνοντας την αβεβαιότητα, μειώνεται και ο κίνδυνος περιβαλλοντικής και οικονομικής αποτυχίας. Τέλος επισήμαναν πως η λήψη νέων τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας αποτελεί τη βέλτιστη λύση για τη μείωση της γεωλογικής αβεβαιότητας.

Οι Wagner et al., (1992) ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν τη στοχαστική βελτιστοποίηση με την αξία της πληροφορίας, όπως γίνεται και στην εν λόγω έρευνα. Η διαχειριστική στρατηγική αποσκοπούσε στην εξυγίανση ενός υποθετικού υδροφορέα από έναν ρύπο και η αντικειμενική συνάρτηση στόχευε στη μείωση του κόστους αυτής της στρατηγικής, με περιορισμούς στα υδραυλικά ύψη, στις κλίσεις αυτών και στις παροχές των πηγαδιών άντλησης. Επιλύθηκαν τρία προβλήματα, από τα οποία το τρίτο μόνο αντιμετωπίστηκε στοχαστικά: i) το πρώτο είχε να κάνει με έναν ομογενή υδροφορέα, ii) το δεύτερο αντιμετώπιζε τον υδροφορέα πάλι ως ομογενή, αλλά οι περιορισμοί των κλίσεων των υδραυλικών υψών είχαν οικονομικό αντίκτυπο που εμπεριέχοναν στην αντικειμενική συνάρτηση και iii) ο υδροφορέας ήταν ετερογενής. Η στοχαστική βελτιστοποίηση οφειλόταν στη στοχαστική προσέγγιση της υδραυλικής αγωγιμότητας, η οποία αντιμετωπίστηκε με τη χρήση των περιστρεφόμενων ταινιών. Κάθε πρόβλημα της βελτιστοποίησης επιλύονταν για κάθε πραγμάτωση ($N=100$) και η αξία της πληροφορίας εφαρμοζόταν για κάθε βέλτιστη λύση. Η αξία της πληροφορίας στην εν λόγω εργασία αποτιμάται ως η διαφορά των αντικειμενικών συναρτήσεων των τριών σεναρίων. Δεν προβλέφθηκε η λήψη νέας τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας και ανανέωσης με τη χρήση της ανάλυσης Bayes, πόσο μάλλον η εύρεση της θέσης της. Ο στόχος όμως των συγγραφέων ήταν να αναδείξουν και το κατάφεραν έπειτα από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, πως ο συνδυασμός της στοχαστικής αντιμετώπισης με την αξία της πληροφορίας αποτελεί μία επιτυχημένη συνταγή για τη διαχείριση των υπόγειων υδατικών συστημάτων.

Οι James et al., (1996) πρότειναν ένα πλαίσιο λήψης απόφασης για την αύξηση της αποτελεσματικότητας της διαχείρισης στην εξυγίανση ενός υπόγειου υδροφορέα από έναν ραδιενεργό ρύπο, υπό συνθήκες αβεβαιότητας των παραμέτρων. Ο υδροφορέας

ήταν υποθετικός τριών στρωμάτων και οι παράμετροι που αντιμετωπίστηκαν στοχαστικά ήταν τρεις για κάθε στρώμα: η υδραυλική αγωγιμότητα, ο συντελεστής κατανομής και η διαμήκης διασπορά. Η στοχαστική προσομοίωση επετεύχθη με μέθοδο Latin Hypercube της Monte Carlo και παρήχθησαν 100 πραγματώσεις. Οι στόχοι του προτεινόμενου πλαισίου ήταν τρεις: i) να προτείνει τον οικονομικότερο και αποτελεσματικότερο τρόπο εξυγίανσης ανάμεσα σε παρακολούθηση μόνο, απομόνωση του ρύπου και εγκατάσταση συστήματος εξυγίανσης, ii) να εκτιμήσει αν η συλλογή επιπλέον πληροφορίας αξίζει να πραγματοποιηθεί και iii) να καθορίσει ποια από τις τρεις παραμέτρους θα είναι αυτή για την οποία θα ληφθούν νέες μετρήσεις. Εδώ, η εργασία αυτή αποκλίνει της διαδικασίας που ακολουθεί η εν λόγω έρευνα, αλλά αναφέρεται για δύο σημαντικούς λόγους, οι οποίοι υιοθετήθηκαν. Δεν υπήρχε λήψη νέας πληροφορίας, απλά έγινε η εκτίμηση του αβέβαιου κόστους, το οποίο οι συγγραφείς πρότειναν πως ισοδυναμεί με το κόστος που αξίζει να δαπανηθεί για να ξεκινήσει μια στρατηγική λήψης νέας πληροφορίας μέσω της διαδικασίας της αξίας της πληροφορίας. Η αβεβαιότητα αυτή ισούταν με τη διαφορά ανάμεσα στο μέγιστο και στο ελάχιστο κόστος από τις 100 απεικονίσεις. Ας ξεκαθαριστεί εδώ πως οι 100 απεικονίσεις λύθηκαν και για τους τρεις τρόπους εξυγίανσης. Έτσι, για κάθε τρόπο εξυγίανσης κατατάχθηκε σε αύξουσα σειρά το κόστος κάθε πραγμάτωσης και η διαφορά του μέγιστου με το ελάχιστο έδωσε το κόστος αβεβαιότητας, για το οποίο οι συγγραφείς κατέληξαν πως άξιζε να δαπανηθεί για τη στρατηγική λήψης νέας πληροφορίας. Οι συγγραφείς, εφόσον κατέληξαν πως αξίζει να παρθεί νέα πληροφορία, έπρεπε να εξετάσουν μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας ποια από τις παραμέτρους είχε την μεγαλύτερη επίδραση στη μείωση της αβεβαιότητας. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν την υδραυλική αγωγιμότητα για άλλη μια φορά.

O Wagner (1999), παρουσίασε ένα πλαίσιο λήψης απόφασης για την εκτίμηση της αξίας της νέας πληροφορίας στο πλαίσιο της βέλτιστης διαχείρισης εξυγίανσης ενός υποθετικού υπόγειου υδροφορέα από ρύπο, υπό συνθήκες υδρογεωλογικής αβεβαιότητας. Το πλαίσιο αυτό αποτελείται από ένα μοντέλο προσομοίωσης-βελτιστοποίησης, από το οποίο θα προκύψουν οι βέλτιστες διαχειριστικές λύσεις για την απορρύπανση του υπόγειου υδροφορέα και μια μεθοδολογία για την εύρεση τόσο της θέσης όσο και της παραμέτρου (ή παραμέτρων) της οποίας θα αξιοποιηθεί η νέα πληροφορία. Στόχος της στοχαστικής βελτιστοποίησης ήταν η μείωση του κόστους εξυγίανσης με περιορισμό στη συγκέντρωση του ρύπου. Ο Wagner έδειξε μέσω του προβλήματος βελτιστοποίησης πως με τη λήψη νέας πληροφορίας δεν μειώνεται μόνο η αβεβαιότητα που προκαλούν οι αβέβαιοι παράμετροι (υδραυλική αγωγιμότητα, διαμήκης και εγκάρσια διασπορά), αλλά και το κόστος. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης διατυπωνόταν ως εξής:

$$\min R_p \sum q_j \quad (4.15)$$

με περιορισμό:

$$E[c_i] + F^{-1}(\pi)sd[c_i] \leq c^* \quad (4.16)$$

όπου q_i = η παροχή άντλησης από το πηγάδι αποκατάστασης, c_i = η συγκέντρωση του ρύπου στη θέση i , R_p = μοναδιαίο κόστος που απαιτείται για την αποκατάσταση (λειτουργία, άντληση, αποκατάσταση και απομάκρυνση ρύπου), $E[\cdot]$ = αναμενόμενη τιμή, $sd[\cdot]$ = τυπική απόκλιση και $F^{-1}(\pi)$ = τιμή της τυπικής κανονικής αθροιστικής κατανομής της αξιοπιστίας π . Στην περίπτωση που οι παράμετροι είναι αβέβαιοι, χωρίς τη συμβολή της ανάλυσης των αποφάσεων, η στρατηγική αποκατάστασης πρέπει να υπερσχεδιαστεί ώστε η αξιοπιστία της να είναι δεδομένη. Ο περιορισμός του προβλήματος βελτιστοποίησης παίζει έναν καθοριστικό ρόλο στον σχεδιασμό της βέλτιστης στρατηγικής άντλησης και στον καθορισμό του κόστους σχεδιασμού. Καθώς η αβεβαιότητα των παραμέτρων του μοντέλου αυξάνει, αυξάνει και η τυπική απόκλιση $sd[c_i]$. Για να ικανοποιηθεί όμως ο περιορισμός πρέπει να μειωθεί η αναμενόμενη τιμή των συγκεντρώσεων του ρύπου, το οποίο επιτυγχάνεται μόνο μέσω της αύξησης της άντλησης. Αυτό συνεπάγεται όμως και αύξηση του κόστους, με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε μια κατάσταση υπερσχεδιασμού. Με τη συμβολή της αξίας της πληροφορίας, η λήψη νέων μετρήσεων θα οδηγήσει σε μείωση της αβεβαιότητας, άρα μείωση της τυπικής απόκλισης $sd[c_i]$, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται η αύξηση της άντλησης και άρα του κόστους. Όσο πιο πολύ θα μειώνεται η αβεβαιότητα, μέσω της διαδικασίας της λήψης νέων μετρήσεων, τόσο το πρόβλημα της βελτιστοποίησης θα ικανοποιείται με λιγότερο κόστος. Η λήψη αυτών των νέων μετρήσεων, πρότεινε ο συγγραφέας, πρέπει να λαμβάνεται από τις θέσεις εκείνες για τις οποίες η τυπική απόκλιση λαμβάνει τη μέγιστη τιμή για την εκάστοτε παράμετρο. Αυτήν ακριβώς τη μεθοδολογία, ως προς τη θέση της νέας μέτρησης, υιοθετεί και η εν λόγω έρευνα. Κάθε νέα μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας, θα λαμβάνεται από τη θέση εκείνη, στην οποία η τυπική απόκλιση των N στοχαστικών πραγματώσεων της K , θα έχει τη μέγιστη τιμή. Στην εργασία του ο Wagner (1999), δεν έκανε χρήση των δύο καταστάσεων της ανάλυσης Bayes (εκ των προτέρων και εν των υστέρων) μιας και ο υδροφορέας του ήταν γνωστός (υποθετικός φορέας, τον οποίο ο ίδιος όρισε). Σε κάθε εκστρατεία λήψης νέας πληροφορίας, ένα σύνολο από δειγματοληπτικές τιμές των παραμέτρων λαμβάνονταν υπόψη και όχι μία μεμονωμένη τιμή μόνο. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η λήψη νέας πληροφορίας από τη συγκέντρωση του ρύπου και της υδραυλικής αγωγιμότητας ταυτόχρονα αποτελεί έναν βέλτιστο συνδυασμό, μιας και οδηγεί σε ταυτόχρονη μείωση της αβεβαιότητας και του κόστους της δειγματοληψίας. Αυτό, όπως δηλώνει και ο συγγραφέας, οφείλεται στο μεγάλο κόστος που απαιτείται για τη λήψη νέας μέτρησης της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Οι Feyen και Gorelick (2005) ήταν οι πρώτοι που εφάρμοσαν την αξία της πληροφορίας σε πρόβλημα ποσότητας του υπόγειου ύδατος, υπό συνθήκες αβεβαιότητας. Μάλιστα, έπειτα από σχολαστική έρευνα, δεν έχει βρεθεί άλλη εργασία σε διεθνές περιοδικό, που να κάνει χρήση της αξίας της πληροφορίας σε θέματα διαχείρισης ποσότητας. Η εργασία αυτή είναι και η πιο πλήρης, από όσες λήφθηκαν υπόψη για την εν λόγω έρευνα. Μελέτησαν τμήμα ενός πραγματικού φρεάτιου υδροφορέα, αυτού της πόλης Dade στη νοτιοδυτική Florida, ο οποίος είχε υποβαθμιστεί σημαντικά και η κατάσταση αυτή επηρέαζε άμεσα και τον υγρότοπο της περιοχής μελέτης. Στόχος της διαχειριστικής στρατηγικής ήταν να αντλήσουν το μέγιστο

επιτρεπτό υπόγειο νερό, το οποίο θα υδροδοτούσε την πόλη, υπό τον περιορισμό κατώτερων οικολογικών ορίων που είχαν θεσπιστεί για την προστασία του υδροφορέα, αλλά πολύ περισσότερο του υγροτόπου. Το πλαίσιο που πρότειναν χαρακτηρίστηκε ως πλήρες, διότι αποτελούνταν από ένα στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης-βελτιστοποίησης και έκανε χρήση των τριών καταστάσεων της ανάλυσης Bayes, για την αξία της νέας πληροφορίας. Επιπλέον η υδραυλική αγωγιμότητα είναι η παράμετρος που αντιμετωπίζεται στοχαστικά και της οποίας η αξία της πληροφορίας αποτιμάται, όπως και στην εν λόγω έρευνα. Θεωρούν και αυτοί πως ο συνδυασμός της προσομοίωσης-βελτιστοποίησης με την ανάλυση αποφάσεων αποτελούν ένα ισχυρό και ολοκληρωμένο πλαίσιο διαχείρισης των υπόγειων υδατικών συστημάτων. Μάλιστα, όπως δηλώνεται και μέσα στην εργασία, αυτή αποτελεί την πρώτη απόπειρα αυτού του συνδυασμού. Κάτι αντίστοιχο είχε κάνει και οι Wagner (1992), αλλά όχι σε τόσο ολοκληρωμένη βάση. Για τη στοχαστική προσομοίωση-βελτιστοποίηση στηρίχθηκε στην εργασία των Wagner και Gorelick (1989), η οποία παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο και για την ανάλυση των αποφάσεων, η οποία εδώ εμφανίζεται με τη μορφή της αξίας της πληροφορίας, στηρίχθηκε στην εργασία των Freeze et al., (1992), η οποία και αυτή παρουσιάστηκε προηγουμένως. Οι συγγραφείς κάνουν τον συσχετισμό ανάμεσα στην αβεβαιότητα και στο κέρδος από τις πωλήσεις του υπόγειου νερού, όπως είχε κάνει και ο Wagner (1999), αλλά για το κόστος. Χωρίς τη χρήση της αξίας της πληροφορίας, η οποία οδηγεί σε μείωση της αβεβαιότητας, ο διαχειριστής, μέσω της βελτιστοποίησης, θα αντλούσε λιγότερες ποσότητες ύδατος, άρα θα είχε μικρότερο κέρδος. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που χρησιμοποιήθηκε η αξία της πληροφορίας στην εν λόγω έρευνα. Η μεθοδολογία ξεκίνησε με την στοχαστική εξαρτημένη προσομοίωση της υδραυλικής αγωγιμότητας, θεωρώντας το πεδίο της δευτέρου βαθμού στάσιμο και κανονικό. Με τη χρήση της Monte Carlo προέκυψαν 100 ισοπίθανες πραγματώσεις. Για το πρόβλημα της βελτιστοποίησης, επικαλέστηκε το μοντέλο πολλαπλής πραγμάτωσης των Wagner και Gorelick (1989), στο οποίο η αντικειμενική προέβλεπε τη μεγιστοποίηση του καθαρού κέρδους από την πώληση του υπόγειου αντλούμενου ύδατος και η οποία υπάκουε στους 100 περιορισμούς υδραυλικού ύψους. Έτσι, η αξία της πληροφορίας εκτελέστηκε για τις βέλτιστες λύσεις (βέλτιστοι συνδυασμοί θέσης και παροχής άντλησης των πηγαδιών), οι οποίες αναπτύχθηκαν και για τις τρεις καταστάσεις της Bayes ανάλυσης. Εφόσον πρόκειται για πρόβλημα ποσότητας του υπόγειου ύδατος, η αξία της πληροφορίας εκτιμήθηκε ως η συνεισφορά της στη μείωση της αβεβαιότητας από τα καθαρά κέρδη. Ο σχεδιασμός της στρατηγικής της δειγματοληψίας, όμως, δεν κινούνταν με βάση τη μεγαλύτερη τιμή της τυπικής απόκλισης από τους χάρτες της υδραυλικής αγωγιμότητας, αλλά χωρίστηκε η περιοχή σε ζώνες, από τις οποίες γινόταν λήψη πέντε τιμών της K. Αναζητούνταν η ζώνη εκείνη με τη μεγαλύτερη αναμενόμενη αξία των πέντε νέων μετρήσεων της. Οι συγγραφείς ξεκαθαρίζουν πως η μέθοδος αυτή είναι πιο πολύωρη και ότι έγινε από επιλογή τους, για ερευνητικούς λόγους. Η διαδικασία σταματούσε στη πρώτη ζώνη που βρέθηκε να έχει αναμενόμενη αξία των πέντε νέων μετρήσεων της μικρότερη από το κόστος δειγματοληψίας αυτών. Τα αποτελέσματα ήταν εντυπωσιακά, αφού ο διαχειριστής με τη χρήση αυτού του συνδυασμού είχε οφέλη μέχρι και 50% από τις πωλήσεις του νερού.

Πίνακας 4. 1. Κατηγοριοποίηση των εργασιών της αξίας της πληροφορίας, που λήφθηκαν υπόψη για την εν λόγω έρευνα

ΥΠΟΜΝΗΜΑ:					
e: Οικονομική αποτίμηση			O: Βελτιστοποίηση		
s: εύρεση θέσης δειγματοληψίας νέας πληροφορίας			c: Πρόβλημας ποιότητας/ρύπανσης		
K: Η υδραυλική αγωγιμότητα ως η υπό μελέτη παράμετρος					
Εργασίες πάνω στην αξία της πληροφορίας στην υδρογεωλογία	Βασικά στοιχεία έρευνας				
	e	s	K	O	c
Gate & Kisiel, 1974			*		
Bredehoeft & Young, 1983	*				
Feinerman et al., 1985	*				
Grosser & Goodman, 1985	*				*
Rouhani, 1985	*	*			
Ben-Zvi et al., 1988	*				*
Marin et al., 1989	*				*
Medina et al., 1989	*		*		*
Freeze et al., 1992	*	*	*	*	*
Wagner et al., 1992	*	*	*	*	*
James & Freeze, 1993	*	*	*		*
James & Gorelick, 1994	*	*	*		*
Abbaspour et al., 1996	*	*	*		*
James et al., 1996		*	*		
Wagner, 1999	*	*	*	*	*
Borisova et al., 2005	*				*
Feyen & Gorelick, 2005	*	*	*	*	*
Norberg & Rosen, 2006	*	*			*
Bau & Mayer, 2007	*	*	*	*	*
Ma & Chang, 2008	*	*	*	*	*
Dausman et al., 2010		*			
Rojas et al., 2010		*	*		
Liu et al., 2012	*	*		*	*

5. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

5.1. Υδρολογική λεκάνη απορροής λίμνης Κάρλας

Η λεκάνη της λίμνης Κάρλας βρίσκεται στα νοτιοανατολικά του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας (GR08), ανάμεσα στις πόλεις του Βόλου και της Λάρισας (Σχήμα 5.1). Πρόκειται για μια επιμήκης κλειστή λεκάνη μήκους 35 Km και πλάτους 15 Km καταλαμβάνοντας την ανατολική πεδιάδα της Π.Ε. Λάρισας και την αντίστοιχη δυτική της Π.Ε. Μαγνησίας. Είναι κλειστή διότι περιβάλλεται από ορεινούς όγκους με το χαμηλότερό της απόλυτο υψόμετρο (+44 m) να βρίσκεται ανάμεσα στους οικισμούς του Στεφανοβικείου και Καναλίων, εκεί όπου σήμερα οριοθετείται ο ταμιευτήρας της Κάρλας, χωρίς να υπάρχει φυσική επιφανειακή υδραυλική της επικοινωνία με τη θάλασσα. Έχει έκταση 1660 Km², η οποία εκτείνεται σε γεωγραφικό πλάτος από 39°20'56'' νότια μέχρι 39°45'15'' βόρεια και 22°26'10'' ανατολικά μέχρι 23°0'27'' δυτικά. Τα όρια της αποτελούν ο ποταμός Πηνειός και η κορυφογραμμή του όρους Όσσα στο βορρά, το μισό δυτικό τμήμα της πεδιάδας της Αγιάς και η κορυφογραμμή του όρους Μαυροβουνίου στα ανατολικά, η κορυφογραμμή του βόρειου Πηλίου και του Όρους Μεγαβούνι στα νότια, η κορυφογραμμή του όρους Χαλκοδόνη στα νοτιοδυτικά και στα ανατολικά οι λοφοσειρές των οικισμών Ν. Περιβόλι, Νέα Λεύκη της Λάρισας και το υπόλοιπο πεδινό τμήμα αυτής από τη Νέα Λεύκη ως τη Λάρισα. Το υψόμετρο της ποικίλει από τα +40 m έως και τα +2000 m. Χαρακτηρίζεται ως καθαρά αγροτική λεκάνη, διότι σχεδόν το 60% της έκτασης της καταλαμβάνεται από καλλιέργειες. Δεν εντοπίζεται κάποιο αστικό κέντρο εντός των ορίων της, ούτε και κάποια βιομηχανική περιοχή. Με εξαίρεση κάποια γραφικά ορεινά χωριά δεν αποτελεί τόπο τουριστικού ενδιαφέροντος. Μετά το 1950, με την κατασκευή του συλλεκτήρα Σ1 αποκόπηκε τμήμα της λεκάνης και η έκταση της λεκάνης απορροής της Κάρλας είναι πλέον 1170 Km². Η σήραγγα της Κάρλας, η οποία κατασκευάστηκε για την αποξήρανση της λίμνης το 1960 αποτελεί τη μόνη διέξοδο των επιφανειακών υδάτων της λεκάνης στη θάλασσα. Συγκεκριμένα η σήραγγα καταλήγει στον Παγασητικό Κόλπο, εντός της πόλης του Βόλου στην περιοχή Μπουρμπουλήθρα της Νεάπολης.

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται ο χάρτης της λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας. Τα όριά της απεικονίζονται με την κόκκινη γραμμή. Η μαύρη γραμμή αναπαριστά τα όρια του υπό μελέτη φρεάτιου υπόγειου υδροφορέα αυτής, ο οποίος έχει έκταση 500 Km² και καταλαμβάνει το πεδινό τμήμα αυτής. Απεικονίζονται επίσης, οι ορεινοί όγκοι που αναφέρθηκαν προηγουμένως, το υδρογραφικό της δίκτυο με τις τεχνητές τάφρους, η νέα λίμνη Κάρλα και οι μικροί πεδικοί ταμιευτήρες άρδευσης του ΤΟΕΒ Πηνειού.



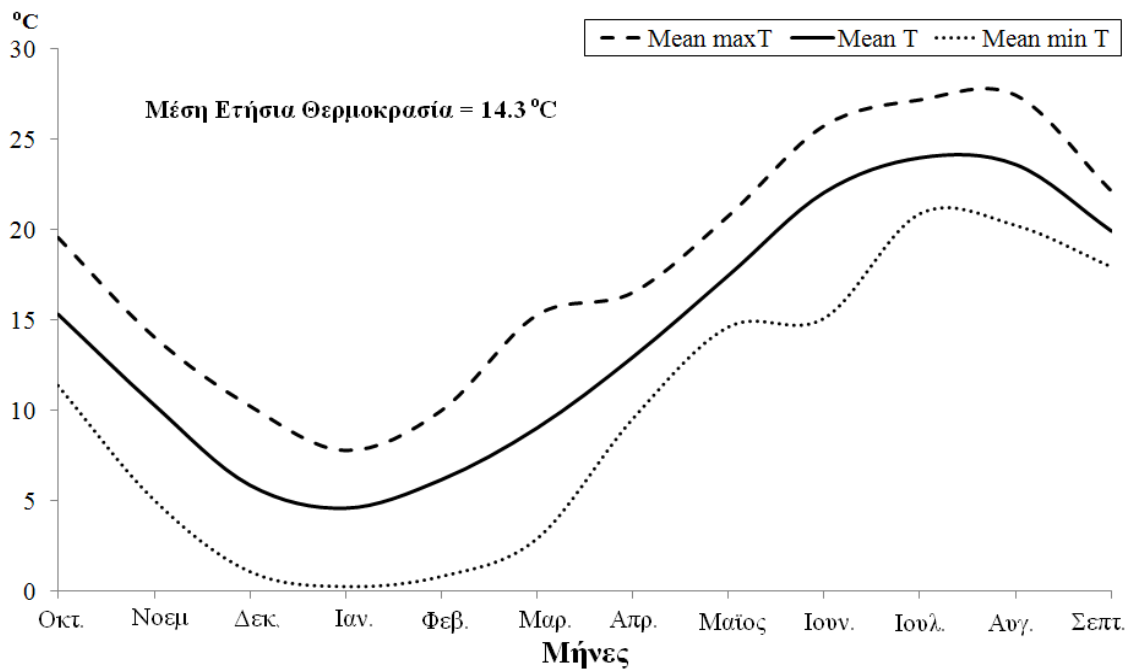
Σχήμα 5. 1. Χάρτης της υδρολογικής λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας

5.2. Κλιματικές – Υδρολογικές συνθήκες

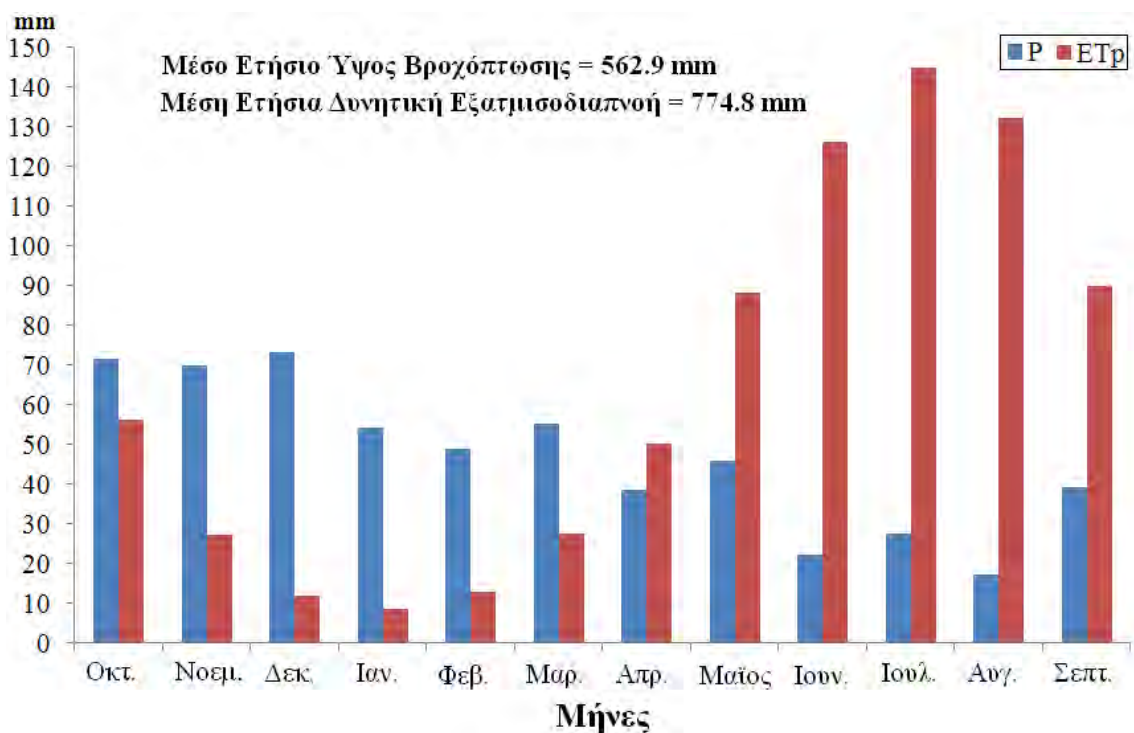
Οι κλιματικές συνθήκες μια περιοχής χαρακτηρίζονται από την ποσότητα και κατανομή των βροχοπτώσεων, τη διακύμανση της θερμοκρασίας, την ηλιοφάνεια, την υγρασία, την εξάτμιση και τους ανέμους. Το κλίμα της λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό, εύκρατου ηπειρωτικού χαρακτήρα. Χαρακτηριστικό αυτού του κλίματος είναι το ξερό και θερμό καλοκαίρι και ο ψυχρός και υγρός χειμώνας. Επηρεάζεται άμεσα από το αντικυκλωνικό σύστημα του Ατλαντικού μετά την επέκτασή του προς την ΝΑ Ευρώπη. Τον Οκτώβριο ξεκινούν συνθήκες ύφεσης, οι οποίες προκαλούν αυξημένη υγρασία, βροχόπτωση και παρουσία ομίχλης και διαρκούν μέχρι τον Απρίλιο. Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού παρατηρείται απουσία βαροβαθμίδας, η οποία έχει ως συνέπεια την εμφάνιση επιπλέον ξηρασίας λόγω της

ομοιόμορφης κατανομής της πίεσης, η οποία ευθύνεται για τις αυξημένες θερμοκρασίες που απαντώνται στην περιοχή κατά την διάρκεια του καλοκαιριού.

Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 14 °C ως 16 °C. Το ετήσιο θερμομετρικό εύρος ξεπερνά τους 22 °C. Οι πιο θερμοί μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος και οι πιο ψυχροί ο Ιανουάριος, ο Φεβρουάριος και ο Δεκέμβριος. Οι παγετοί είναι συχνοί και εμφανίζονται κατά την περίοδο Νοεμβρίου - Απριλίου. Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται γράφημα με τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες, οι οποίες προέκυψαν από χρονοσειρά σαράντα ετών από τους σταθμούς της περιοχής. Η βροχή αποτελεί μια από τις σπουδαιότερες μετεωρολογικές παραμέτρους. Η μελέτη της παρουσιάζει όχι μόνο θεωρητικό αλλά και πρακτικό ενδιαφέρον και αυτό που ενδιαφέρει περισσότερο είναι η ποσότητα νερού που πέφτει σε μια επιφάνεια. Σε κάθε περιοχή οι μηνιαίες βροχοπτώσεις παρουσιάζουν την ιδιότητα να μεταβάλλονται σταθερά προς ορισμένες κατευθύνσεις. Αυτό οφείλεται σε διάφορους μετεωρολογικούς παράγοντες όπως: απόσταση από τη θάλασσα, επικράτηση ανέμων, κίνηση των υφέσεων και είναι ιδιαίτερα έντονο κατά τους υγρούς μήνες, όταν το ύψος των βροχοπτώσεων είναι μεγάλο. Το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στη λεκάνη απορροής είναι σχετικά μεγάλο στο ορεινό ανατολικό τμήμα, αλλά μειώνεται στο κεντρικό πεδινό. Η μέση ετήσια βροχόπτωση της λεκάνης απορροής είναι περίπου 560 mm (Σχήμα 5.3) και κατανέμεται ανομοιόμορφα τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Η μέση ετήσια βροχόπτωση ποικίλει από περίπου 400 mm στο κεντρικό τμήμα, έως και πάνω από 700 mm στις ανατολικές ορεινές περιοχές. Οι πιο βροχεροί μήνες είναι από τον Οκτώβριο ως τον Ιανουάριο, ενώ οι πιο ξηροί ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Η μέση ετήσια σχετική υγρασία κυμαίνεται από 67% μέχρι 72% και παρουσιάζει μεταβολές τόσο στη διάρκεια του 24ώρου όσο και του έτους. Η εξάτμιση της λεκάνης είναι σημαντική τους ξηρούς μήνες από Μάιο μέχρι και Σεπτέμβριο, γεγονός το οποίο δεν οφείλεται μόνο στην μεγάλη ένταση της ακτινοβολίας, αλλά και στην έντονη παρουσία της γλωρίδας τόσο στα πεδινά από τις καλλιέργειες όσο και στα ορεινά από τα δασικά οικοσυστήματα. Η μέση ετήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή είναι 770 mm (Σχήμα 5.3). Η συχνότητα εμφάνισης των ανέμων εξαρτάται τόσο από την εποχή όσο και από τον μήνα, ώστε οι άνεμοι να διακρίνονται σε ανατολικούς, οι οποίοι επικρατούν την περίοδο άνοιξης – καλοκαιριού, σε ανατολικούς – βορειοανατολικούς κατά την διάρκεια του φθινοπώρου και τέλος βορειοανατολικοί οι οποίοι πνέουν κατά την διάρκεια του χειμώνα. Ετησίως η συχνότητα των ανέμων χαρακτηρίζεται έντονη κατά τους χειμερινούς μήνες (Δεκέμβριος) και ελαχιστοποιείται στα μέσα του καλοκαιριού (Ιούλιος). Οι ταχύτητες των παραπάνω ανέμων είναι της τάξης των 1-3 Bf με μέγιστη ταχύτητα τα 8 Bf. Η επικρατούσα φορά των ανέμων στη λεκάνη είναι η ανατολική.



Σχήμα 5. 2. Μέση ετήσια θερμοκρασία για τη λεκάνη της Κάρλας



Σχήμα 5. 3. Μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης και μέση ετήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή για τη λεκάνη της Κάρλας

Μέχρι την αποξήρανση της λίμνης Κάρλας το 1962, η υδρολογική δίαιτα της λεκάνης ήταν πλούσια, μιας και η τέως λίμνη καταλάμβανε σημαντική έκταση του κάμπου. Το φαινόμενο αντιστράφηκε με την αποξήρανσή της, με αποτέλεσμα η περιοχή να έχει φτωχό επιφανειακό υδατικό δυναμικό, μιας και η αποξήρανση επηρέασε και το μικροκλίμα. Οι μόνοι συνεχούς ροής ποταμοί που συναντώνται στη λεκάνη είναι το

Ασμάκι (8Τ) της Λάρισας, παραπόταμος του Πηνειού, ο οποίος άλλοτε τροφοδοτούσε τη λίμνη Κάρλα, ενώ τώρα έχει διευθετηθεί και χρησιμοποιείται για αρδευτικούς σκοπούς και ο Άμυρος, στον δυτικό κάμπο της Αγιάς, ο οποίος τροφοδοτείται από τις απορροές της Όσσας και μετά τη διευθέτησή του καταλήγει στην τάφρο 1Τ για να εξυπηρετήσει και αυτός αρδευτικές ανάγκες. Η παρουσία των δύο ποταμών αυτών καθιστά κάπως καλύτερη την εικόνα του βόρειου τμήματος από υδρολογική άποψη, ενώ το κεντρικό και νότιο τμήμα πραγματικά μαστίζονται από έλλειψη επιφανειακών υδατικών πόρων. Αυτός είναι και ο λόγος που η ικανοποίηση των αρδευτικών αναγκών γίνεται εξ' ολοκλήρου από το υπόγειο υδατικό δυναμικό και είναι επίσης και ένας από τους λόγους ανασύστασης της λίμνης Κάρλας.

5.3. Χρήσεις Γης

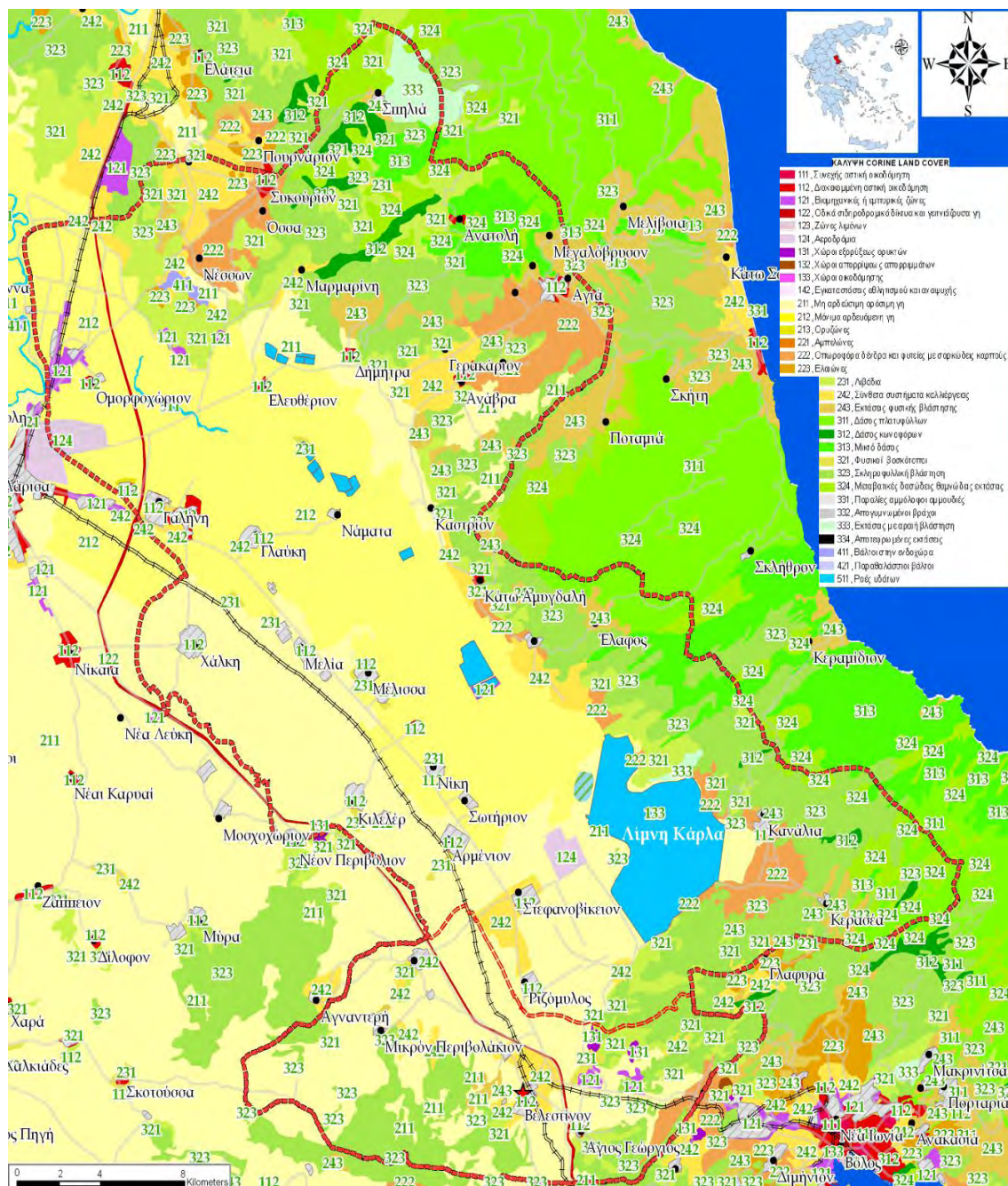
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η λεκάνη χαρακτηρίζεται ως αγροτική και μάλιστα εντόνως καλλιεργούμενη με υδρόφιλες καλλιέργειες, όπως το βαμβάκι. Σύμφωνα με την καταγραφή της κάλυψης γης, που έγινε στο πλαίσιο του προγράμματος Corine Land Cover, η κάλυψη γης της περιοχής μελέτης παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.1 και στο γράφημα του Σχήματος 5.4 που ακολουθεί και απεικονίζεται χωρικά στο χάρτη του Σχήματος 5.5.

Πίνακας 5. 1. Χρήσεις γης και ποσοστά αυτών στη λεκάνης απορροής της Κάρλας

Χρήσεις γης	Έκταση (στρ.)	Ποσοστό κατανομής
Αστικές Δραστηριότητες	22789	1.98%
Μη Αρδεύσιμη – Αρόσιμη Γη	153146	13.28%
Μόνιμα Αρδεύσιμη Γη	440804	38.22%
Αμπελώνες	9521	0.83%
Παραλίες – Αμμόλοφοι – Αμμουδιές	265	0.02%
Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	10319	0.89%
Αποτεφρωμένες εκτάσεις	4126	0.36%
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	123206	10.68%
Γεωργικοδασικές περιοχές	1168	0.10%
Δάσος πλατύφυλλων	8858	0.77%
Δάσος κωνοφόρων	8414	0.73%
Μικτό δάσος	24080	2.09%
Βοσκότοποι	71436	6.19%
Θάμνοι και χερσότοποι	6600	0.57%
Σκληροφυλλική Βλάστηση	236696	20.52%
Μεταβατικές δασώδεις - θαμνώδεις εκτάσεις	31552	2.74%
Ροές υδάτων	460	0.04%
Σύνολο	1153440	100%



Σχήμα 5. 4. Ποσοστιαία κάλυψη των χρήσεων γης



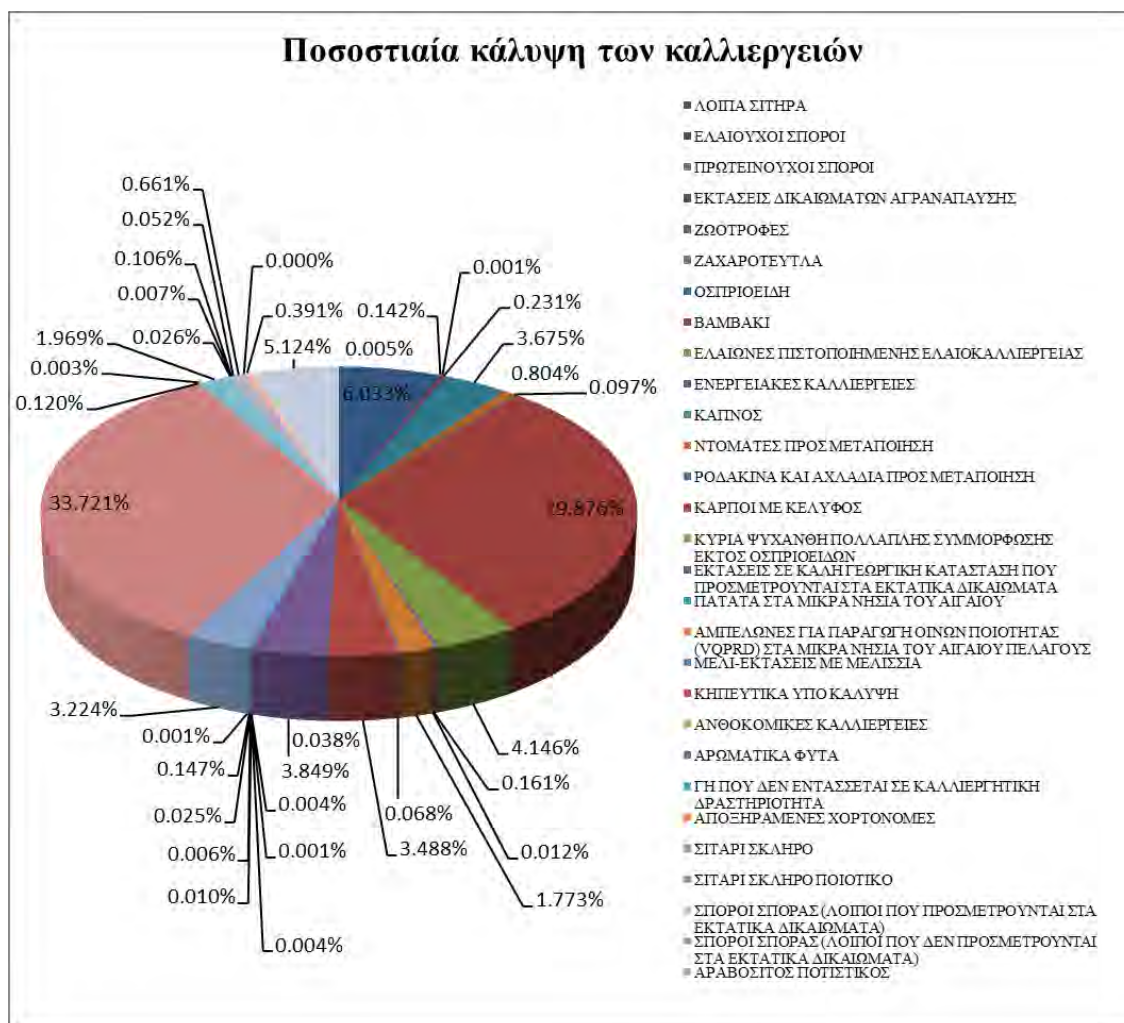
Σχήμα 5. 5. Χάρτης χρήσεων γης με τους κωδικούς τους για τη λεκάνης της Κάρλας

Από τα στοιχεία του προαναφερόμενου πίνακα παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της περιοχής μελέτης (62% αυτής) καλύπτεται από μόνιμα αρδευόμενη γη και από μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη. Ακολουθεί η σκληροφυλλική βλάστηση (με ποσοστό 20.52%) ενώ αρκετά χαμηλότερα βρίσκονται οι βοσκότοποι (6.19%). Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα είδη των καλλιεργειών και η έκτασή τους, ενώ στο γράφημα του Σχήματος 5.6 παρουσιάζεται η ποσοστιαία κάλυψη τους.

Πίνακας 5. 2. Είδη καλλιεργειών της λεκάνης της Κάρλας

ΚΩΔ. ΚΑΛΛΙΕΡΓ. ΟΣΔΕ	ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	ΕΚΤΑΣΗ (ΣΤΡ.)	%
2	ΛΟΙΠΑ ΣΙΤΗΡΑ	32768.44	6.033%
4	ΕΛΑΙΟΥΧΟΙ ΣΠΟΡΟΙ	770.40	0.142%
5	ΠΡΩΤΕΙΝΟΥΧΟΙ ΣΠΟΡΟΙ	6.30	0.001%
6	ΕΚΤΑΣΕΙΣ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ ΑΓΡΑΝΑΠΑΥΣΗΣ	1252.63	0.231%
8	ΖΩΟΤΡΟΦΕΣ	19962.31	3.675%
10	ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΑ	4364.53	0.804%
11	ΟΣΠΡΙΟΕΙΔΗ	528.96	0.097%
12	ΒΑΜΒΑΚΙ	162279.61	29.876%
15	ΕΛΑΙΩΝΕΣ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΕΛΑΙΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ	22518.26	4.146%
16	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ	874.81	0.161%
17	ΚΑΠΝΟΣ	64.00	0.012%
18	ΝΤΟΜΑΤΕΣ ΠΡΟΣ ΜΕΤΑΠΟΙΗΣΗ	9627.73	1.773%
20	ΡΟΔΑΚΙΝΑ ΚΑΙ ΑΧΛΑΔΙΑ ΠΡΟΣ ΜΕΤΑΠΟΙΗΣΗ	370.80	0.068%
21	ΚΑΡΠΟΙ ΜΕ ΚΕΛΥΦΟΣ	18946.91	3.488%
23	ΚΥΡΙΑ ΨΥΧΑΝΘΗ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΣΥΜΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΚΤΟΣ ΟΣΠΡΙΟΕΙΔΩΝ	206.90	0.038%
26	ΕΚΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΚΑΛΗ ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΟΥ ΠΡΟΣΜΕΤΡΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ ΕΚΤΑΤΙΚΑ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΑ	20907.75	3.849%
31	ΠΑΤΑΤΑ ΣΤΑ ΜΙΚΡΑ ΝΗΣΙΑ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ	22.00	0.004%
32	ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΟΙΝΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ (VQPRD) ΣΤΑ ΜΙΚΡΑ ΝΗΣΙΑ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ ΠΕΛΑΓΟΥΣ	4.30	0.001%
35	ΜΕΛΙ-ΕΚΤΑΣΕΙΣ ΜΕ ΜΕΛΙΣΣΙΑ	23.72	0.004%
39	ΚΗΠΕΥΤΙΚΑ ΥΠΟ ΚΑΛΥΨΗ	54.40	0.010%
40	ΑΝΘΟΚΟΜΙΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ	32.35	0.006%
41	ΑΡΩΜΑΤΙΚΑ ΦΥΤΑ	137.30	0.025%
42	ΓΗ ΠΟΥ ΔΕΝ ΕΝΤΑΣΣΕΤΑΙ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ	800.60	0.147%
43	ΑΠΟΞΗΡΑΜΕΝΕΣ ΧΟΡΤΟΝΟΜΕΣ	4.00	0.001%
1.1	ΣΙΤΑΡΙ ΣΚΛΗΡΟ	17509.20	3.224%
1.2	ΣΙΤΑΡΙ ΣΚΛΗΡΟ ΠΟΙΟΤΙΚΟ	183162.68	33.721%
25.2	ΣΠΟΡΟΙ ΣΠΟΡΑΣ (ΛΟΙΠΟΙ ΠΟΥ ΠΡΟΣΜΕΤΡΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ ΕΚΤΑΤΙΚΑ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΑ)	651.80	0.120%
25.3	ΣΠΟΡΟΙ ΣΠΟΡΑΣ (ΛΟΙΠΟΙ ΠΟΥ ΔΕΝ ΠΡΟΣΜΕΤΡΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ ΕΚΤΑΤΙΚΑ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΑ)	18.00	0.003%
3.1	ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΣ ΠΟΤΙΣΤΙΚΟΣ	10693.59	1.969%
3.2	ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΣ ΕΝΣΙΡΩΣΗΣ	139.74	0.026%
36.1	ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ-ΑΝΑΔΙΑΡΘΡΩΣΗ	36.10	0.007%
36.2	ΛΟΙΠΟΙ ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΟΙΝΟΥ	578.14	0.106%
36.3	ΛΟΙΠΟΙ ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ ΓΙΑ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΑ ΧΡΗΣΗ	282.21	0.052%
38.1	ΚΗΠΕΥΤΙΚΑ ΜΑΚΡΑΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ	3591.10	0.661%
38.2	ΚΗΠΕΥΤΙΚΑ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ	1.00	0.000%
45.1	ΛΟΙΠΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ	2123.80	0.391%
45.2	ΛΟΙΠΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ - ΔΕΝΔΡΩΔΕΙΣ	27830.95	5.124%

45.3	ΦΥΤΩΡΙΑ	24.90	0.005%
	ΣΥΝΟΛΟ	543172.22	100%



Σχήμα 5. 6. Ποσοστιαία κάλυψη των καλλιεργειών σε επίπεδο λεκάνης απορροής

Η συνολική έκταση των καλλιεργειών ελάχιστα άλλαξε μέσα στην περίοδο μελέτης. Η μόνη αλλαγή που παρατηρήθηκε ήταν η μείωση της καλλιέργειας του βαμβακιού και η αντικατάστασή του με την καλλιέργεια του σιταριού, σε επίπεδο λεκάνης απορροής, αλλά σε επίπεδο του πεδίου μελέτης του υπόγειου υδροφορέα, το βαμβάκι παραμένει το είδος με τη μεγαλύτερη έκταση καλλιεργειών.

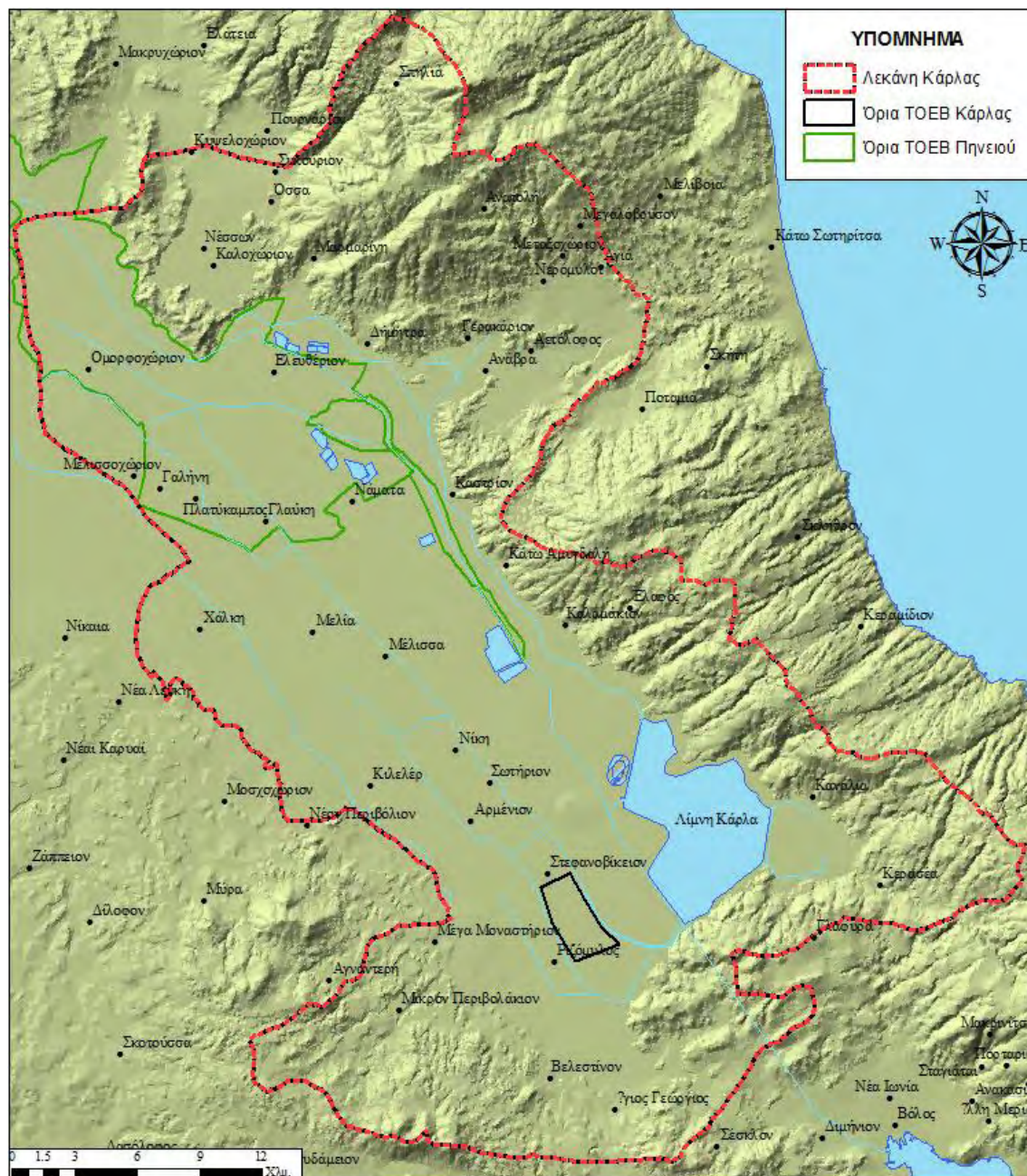
5.3.1. Δίκτυα άρδευσης

Στη λεκάνη της Κάρλας υφίστανται δύο δίκτυα άρδευσης, την χρήση των οποίων έχουν ο ΤΟΕΒ Πηνειού και ο ΤΟΕΒ Κάρλας (Σχήμα 5.7). Το βασικό δίκτυο του ΤΟΕΒ Πηνειού εξυπηρετεί μια έκταση 154000 στρεμμάτων, μέσω των ταμιευτήρων άρδευσης, καταλαμβάνοντας το βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης (Πίνακας 5.3). Πηγή τροφοδοσίας των ταμιευτήρων αποτελεί ο Πηνειός σε μεγάλο ποσοστό και σε μικρότερο ποσοστό τα υπόγεια ύδατα, με τις επιφανειακές απορροές. Τόσο το

επιφανειακό νερό, όσο και το υπόγειο προέρχονται από τη λεκάνη απορροής του Πηνειού και όχι της Κάρλας. Η έκταση που εξυπηρετείται από το εν λόγω δίκτυο ποικίλει από χρονιά σε χρονιά και αυτό εξαρτάται από το επιφανειακό υδατικό δυναμικό του Πηνειού, καθιστώντας την άρδευση ελλειμματική σε χρονιές ανομβρίας. Η κάλυψη των αρδευτικών αναγκών από το δίκτυο του ΤΟΕΒ Πηνειού έχει ληφθεί υπόψη κατά τον υπολογισμό των υδατικών αναγκών. Το δίκτυο αποτελείται από ανοιχτές χωμάτινες τάφρους με αρκετή βλάστηση και ελλιπή συντήρηση, καθιστώντας τις απώλειες ύδατος σημαντικές. Το ΤΟΕΒ Κάρλας εξυπηρετεί μια μικρή έκταση καλλιεργειών, η οποία ίσα που φτάνει τα 10000 στρέμματα, ανάμεσα στους οικισμούς Στεφανοβίκειο και Ριζόμυλο και στις τάφρους 3Τ και 2Τ. Στην πραγματικότητα δεν υπάρχει δίκτυο διανομής του νερού, όπως του ΤΟΕΒ Πηνειού, αλλά ο ΤΟΕΒ Κάρλας έχει στην κυριότητά του έναν αριθμό αρδευτικών γεωτρήσεων με την κάθε μία να εξυπηρετεί μια συγκεκριμένη έκταση καλλιεργειών πέριξ αυτής.

Πίνακας 5. 3. Χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων άρδευσης

Ταμιευτήρας	X	Y	Έκταση (στρ.)	Χωρητικότητα (hm ³)
Καλαμακίου Α	389033	4379550	2123	8
Καλαμακίου Β	389587	4378512	593	
Καστρίου	385517	4384638	274	1
Ναμάτων Β	382747	4387756	338	3
Ναμάτων Α	382139	4387913	575	
Γλαύκης Β	380951	4388267	242	2
Γλαύκης Α	380671	4388643	219	
Πλατύκαμπου Α	375585	4388734	250	1
Πλατύκαμπου Β	380354	4389378	391	1.45
Δήμητρας Β	380292	4393756	146	1
Δήμητρας Γ	379977	4393554	128	
Δήμητρας Α	380471	4393498	140	
Ελευθερίου Β	379050	4393589	188	1.7
Ελευθερίου Α	378464	4393950	321	
			ΣΥΝΟΛΟ	19



Σε παλαιότερους γεωλογικούς χρόνους, φαίνεται ότι από την κοιλάδα των Τεμπών διέφυγαν προς τη θάλασσα όλα τα νερά της ανατολικής Θεσσαλίας. Μεταγενέστερα η περιοχή υπέστη μία γενική καθίζηση, που είναι πιθανό να συνεχίζεται και σήμερα, με αποτέλεσμα η επιφάνεια του εδάφους στο νότιο-ανατολικό τμήμα της λεκάνης να βρεθεί σε χαμηλότερο υψόμετρο απ' ότι στη βόρειο-δυτική πλευρά της. Έτσι η ροή των επιφανειακών υδάτων δεν γινόταν πλέον προς την κοιλάδα των Τεμπών. Το νότιο-ανατολικό τμήμα της ανατολικής Θεσσαλίας κατακλύσθηκε από τα νερά, που σχημάτισαν τη λίμνη της Κάρλας. Κατά καιρούς η λεκάνη δεχόταν όχι μόνο τα νερά των χειμάρρων των γύρω ορεινών περιοχών που συγκλίνουν προς αυτήν, αλλά και τα νερά του Πηνειού ποταμού, που πλημμύριζαν την περιοχή της Λάρισας. Η αρχική φυσική λεκάνη υποδιαιρείται από γεωμορφολογική και υδρολογική άποψη σε έξι υδρολογικές υπολεκάνες, τέσσερις ημιορεινές-ορεινές και δύο πεδινές και οι οποίες είναι:

Ημιορεινές – Ορεινές:

- Υπολεκάνη της Νίκαιας: Περιλαμβάνει τη δυτική και νοτιοδυτική λοφώδη περιοχή της Κάρλας, που εκτείνεται μέχρι τα χωριά Μεσοράχη, Αγ. Ανάργυροι, Κυπάρισσος, Χαλκιάδες, Σκοτούσα. Η υπολεκάνη αυτή αποστραγγιζόταν, μέχρι το 1951, από τον χείμαρρο Κουσμπασανιώτη (Όσγηστος ποταμός) και τροφοδοτούσε την λίμνη της Κάρλας. Από το 1951 και μετά, τα νερά της διοχετεύονται, μέσω του λεγόμενου συλλεκτήρα Σ1, στον Πηνειό. Η έκταση της υπολεκάνης της Νίκαιας ανέρχεται σε 501.2 Km².
- Υπολεκάνη Βελεστίνου: Περιλαμβάνει τη νότια πλευρά της λεκάνης της Κάρλας και έχει έκταση 200 Km². Είναι ορεινή κυρίως περιοχή, που εκτείνεται μέχρι τις κορυφές του Χαλκοδόνιου όρους (υψόμετρο 700 m). Η απορροή της λεκάνης αυτής τροφοδοτεί τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες της περιοχής Βελεστίνου, Ριζόμυλου και Στεφανοβικείου. Σε περιόδους υψηλών βροχοπτώσεων, η επιφανειακή απορροή συλλέγεται από τον συλλεκτήρα Σ4 και οδηγείται στον ταμιευτήρα της Κάρλας.
- Υπολεκάνη Καναλίων: Περιλαμβάνει την ανατολική πλευρά της λεκάνης της Κάρλας, που αποστραγγίζεται από τον χείμαρρο Ξεριά, του οικισμού Κερασιά. Η λεκάνη είναι ορεινή και φθάνει μέχρι υψομέτρου 1000 m περίπου. Στην υπολεκάνη των Καναλίων περιλαμβάνεται και το τμήμα της πεδιάδας της Κάρλας, το οποίο έχει καλυφθεί από τον ταμιευτήρα. Η έκταση της υπολεκάνης των Καναλίων ανέρχεται σε 153.3 Km². Τα νερά της λεκάνης αυτής, καταλήγουν στην πεδιάδα ανατολικά του ταμιευτήρα (κυρίως μέσω του Ξεριά) και έχουν δημιουργήσει φαινόμενα πλημμύρας μιας και οι συλλεκτές δεν έχουν ακόμη κατασκευασθεί πλήρως και το αντιπλημμυρικό αντλιοστάσιο των Καναλίων είναι μικρής δυναμικότητας. Όταν γίνει αυτό, θα συγκεντρώνονται από τους συλλεκτές Σ6 και Σ7 και θα οδηγούνται στον ταμιευτήρα της Κάρλας.
- Υπολεκάνη Καλαμακίου: Η υπολεκάνη αυτή περιλαμβάνει τη βόρεια και βορειοανατολική πλευρά της λεκάνης της Κάρλας, με συνολική έκταση 380.1

Km². Περιλαμβάνει τις εξής μικρότερες υπολεκάνες, οι απορροές των οποίων θα συγκεντρώνονται στον συλλεκτήρα Σ3 και θα οδηγούνται στον ταμιευτήρα της Κάρλας:

- ο Υπολεκάνη Γυρτώνης: Αντιστοιχεί στο πεδινό τμήμα μεταξύ Γυρτώνης και του ρέματος Ασμάκι (περιοχή Χασάμπαλη). Έχει έκταση 50 Km².
- ο Υπολεκάνη Καλοχωρίου: Αντιστοιχεί στην κλειστή λεκάνη, νοτιοδυτικά του Συκουρίου, η οποία όμως στραγγίζεται μέσω καταβόθρων προς τις πηγές της περιοχής Χασάμπαλη. Έχει έκταση 80 Km² και μέσο υψόμετρο του πεδινού της τμήματος 90 - 100 m.
- ο Υπολεκάνη Νότιας Όσσας (βορείως του χωριού Δήμητρα): Είναι πολύ ορεινή περιοχή με έκταση 50 Km².
- ο Υπολεκάνη του Άμυρου ποταμού: Αντιστοιχεί στην πεδιάδα της Αγιάς. Η πεδιάδα αυτή έχει σχηματισθεί μεταξύ της Όσσας και του Μαυροβουνίου και έχει υψόμετρο 100 m περίπου. Η συνολική έκταση της υπολεκάνης ανέρχεται σε 130 Km².
- ο Υπολεκάνη Μαυροβουνίου: Ουσιαστικά πρόκειται για πολλές μικρές λεκάνες χειμάρρων που συγκεντρώνουν τα νερά της δυτικής πλαγιάς του Μαυροβουνίου και εκβάλλουν στην πεδιάδα της Κάρλας. Η συνολική τους έκταση ανέρχεται σε 70.1 Km².

Πεδινές:

Τα επιφανειακά νερά του πεδινού τμήματος της λεκάνης της Κάρλας, το οποίο παλαιότερα καλυπτόταν από τα νερά της λίμνης, συγκεντρώνονται σήμερα σε δύο τάφρους, την 1Τ και 2Τ, που διασχίζουν την περιοχή με κατεύθυνση από ΒΔ προς ΝΑ και καταλήγουν στον ταμιευτήρα της Κάρλας.

- Υπολεκάνη Πλατυκάμπου – Αρμενίου: Είναι η δυτική πεδινή υπολεκάνη της Κάρλας, που περιλαμβάνει την περιοχή που εκτείνεται μεταξύ της τάφρου 3Τ και της κυρίας τάφρου Νίκης ή 2Τ. Η έκτασή της είναι 173.8 Km². Τα νερά της συγκεντρώνονται στην τάφρο 2Τ και οδηγούνται, στον ταμιευτήρα της Κάρλας. Τα νερά της λεκάνης αυτής τροφοδοτούν εν μέρει τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής ανατολικά του Στεφανοβικείου.
- Υπολεκάνη ρέματος Ασμακίου – τάφρου 1Τ: Αποτελεί την ανατολική πεδινή υπολεκάνη, με έκταση 253.1 Km², που παλαιότερα καλυπτόταν από την λίμνη της Κάρλας. Μετά την κατασκευή της σήραγγας, το 1961, η λίμνη αποξηράνθηκε. Σήμερα, τα επιφανειακά νερά αποστραγγίζονται από την τάφρο 1Τ και διοχετεύονται μέσω του αντιπλημμυρικού αντλιοστασίου της Πέτρας στον ταμιευτήρα της Κάρλας. Μόνο σε περίπτωση ανεπάρκειας του αντλιοστασίου ή αδυναμίας του ταμιευτήρα να υποδεχθεί πρόσθετο όγκο, θα οδηγούνται τα νερά της στην σήραγγα. Τα νερά της λεκάνης αυτής τροφοδοτούν τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής βορείως του Στεφανοβικείου.

5.4.2. Στρωματογραφία και Τεκτονική

Η ανατολική Θεσσαλία ανήκει κυρίως στην γεωτεκτονική ενότητα της Πελαγονικής ζώνης, ενώ ένα μικρό τμήμα της, στην περιοχή του Πηλίου, είναι πιθανόν να ανήκει στην Αττικοκυκλαδική Μάζα. Η Πελαγονική ζώνη συγκροτείται από δύο μεγάλες ενότητες:

- Το υπόβαθρο, που σχηματίζεται από τα ημιμεταμορφωμένα πέρμο- τριαδικά πετρώματα (φυλλίτες) και τη σχιστοκερατολιθική διάπλαση με οφιόλιθους.
- Τα ανθρακικά καλύμματα που αποτελούνται από ελαφρά μεταμορφωμένους ασβεστόλιθους Τριαδικού, Ιουραστικού και Κρητιδικού και τοποθετούνται επάνω στους φυλλίτες και στους οφιόλιθους.

Η Αττικοκυκλαδική Μάζα αντιπροσωπεύεται από έντονα μεταμορφωμένα πετρώματα (γνεύσιους και μάρμαρα), τα οποία βρίσκονται επάνω στους σχηματισμούς της Πελαγονικής ζώνης. Συχνά είναι δύσκολο να διαχωριστούν τα μάρμαρα της Αττικοκυκλαδικής από τους μεσοζωικούς ασβεστόλιθους της Πελαγονικής, που είναι επίσης ελαφρά μεταμορφωμένοι.

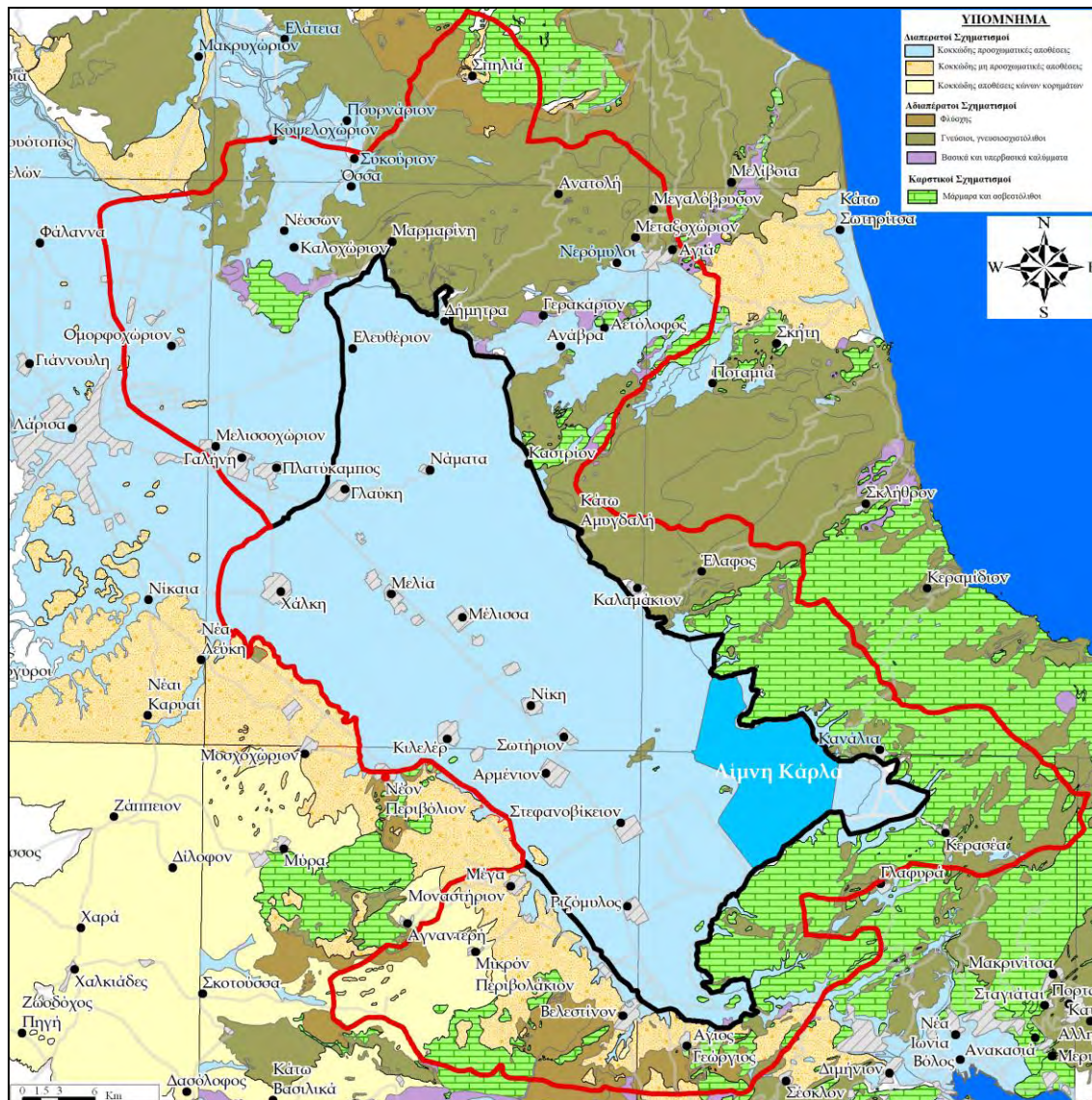
Το Νεογενές συνίσταται κυρίως από ερυθρή άργιλο, πηλό και αργίλοαμμώδη υλικά μικρής συνεκτικότητας, με διαστρώσεις κροκαλολατυποπαγών. Οι βαθύτεροι ορίζοντες αποτελούνται από μάργες, οι οποίες εναλλάσσονται με ερυθρά αργίλομαργαϊκά υλικά. Στην περιοχή Σέσκλο οι αποθέσεις παίρνουν χρώμα κιτρινοκόκκινο, λόγω εμπλουτισμού τους σε έγχρωμα κλαστικά υλικά από τους παρακείμενους γνεύσιους. Μέγιστο πάχος 100 m περίπου.

Οι πρόσφατες τεταρτογενείς αποθέσεις καταλαμβάνουν το πεδινό τμήμα της λεκάνης Κάρλας (Σχήμα 5.8). Αποτελούνται από υλικά ποικίλης κοκκομετρίας ποταμοχειμαρρώδους, ποτάμιας ή και λιμναίας προέλευσης. Το κοκκομετρικό μέγεθος των υλικών γενικά μειώνεται με την απομάκρυνση από τους κύριους κώνους των χειμάρρων που εκβάλουν στην πεδινή ζώνη μεταφέροντας αδρομερή υλικά.

Η λεκάνη της Κάρλας σχηματίστηκε από ένα τεκτονικό βύθισμα, που συνέβη κατά το Πλειόκαινο ή Πλειστόκαινο, στην περιοχή μεταξύ Λάρισας και Βελεστίνου. Το βύθισμα αυτό πληρώθηκε αργότερα με λιμναία ιζήματα και προσχώσεις που προήλθαν από την αποσάθρωση των γύρω οροσειρών. Μέσα στο βύθισμα σχηματίστηκε και η λίμνη Κάρλα. Φαίνεται ότι η απόθεση των προσχώσεων έγινε συγχρόνως με την καταβύθιση της περιοχής, με αποτέλεσμα το πάχος των ιζημάτων να είναι αρκετά μεγάλο και σε ορισμένα σημεία να ξεπερνά τα 300 m. Η πεδιάδα, σήμερα, έχει υψόμετρο 44 – 65 m περίπου.

Το υπόβαθρο της λεκάνης αποτελείται από σχιστόλιθους και μάρμαρα. Τα μάρμαρα βρίσκονται κατά κανόνα εναποθνημένα επάνω στους σχιστόλιθους. Έτσι, η λεκάνη έχει σχηματισθεί επάνω σε αδιαπέραστους σχηματισμούς και είναι σχεδόν απομονωμένη από την θάλασσα του Παγασητικού κόλπου ή του Αιγαίου πελάγους. Όμως, η παρουσία καταβόθρων στην ανατολική πλευρά της λίμνης, από την οποία διέφευγαν τα

νερά της προς γειτονικές περιοχές και πιθανότατα προς το Αιγαίο, δείχνει ότι υπάρχει επικοινωνία (-έστω και μικρή-) μεταξύ θάλασσας και περιοχής της λίμνης.



Σχήμα 5. 8. Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης

Το πάχος των τεταρτογενών αποθέσεων της πεδιάδας της Κάρλας όπως προκύπτει από γεωφυσικές έρευνες (SOGREAH, 1974) ποικίλλει από τόπο σε τόπο και ξεπερνά κατά θέσεις τα 300 m (περιοχή Χάλκης – Αγιάς >550 m) εξαρτώμενο από τη σύνθετη γεωμετρία του υποβάθρου εξαιτίας του τεκτονισμού. Στη μελέτη της SOGREAH (1974), αναφέρεται ότι νοτιοδυτικά των λόφων της Πέτρας και της Μαγούλας, στην περιοχή Στεφανοβικείου, Ριζόμυλου και Βελεστίνου, σχηματίζεται ένα επιμήκες βύθισμα, του οποίου το υπόβαθρο βρίσκεται σε απόλυτο υψόμετρο -200 m. Νοτιοδυτικά των Καναλιών, στο ανατολικότερο σημείο της λεκάνης, σχηματίζεται ένα άλλο βύθισμα, του οποίου το υπόβαθρο βρίσκεται επίσης σε απόλυτο υψόμετρο -200 m. Το δυτικό βύθισμα, στην περιοχή Στεφανοβικείου, λειτούργησε ως φραγμός για τα χονδρόκοκκα υλικά της διάβρωσης, εμποδίζοντας την μεταφορά τους ανατολικότερα. Μεταξύ των δύο αυτών βυθισμάτων παρατηρείται η αναθόλωση του υποβάθρου και η εμφάνιση των λόφων Πέτρας και Μαγούλας. Προφανώς, το έντονο ανάγλυφο του

υποβάθρου οφείλεται σε μεγάλα γεωλογικά ρήγματα, που έχουν διεύθυνση ΒΔ–ΝΑ, παράλληλα με τον γενικό άξονα της λεκάνης της Κάρλας.

Σήμερα στη λεκάνη της Κάρλας υπάρχουν γεωτρήσεις με γλυκό ή υφάλμυρο νερό. Φαίνεται ότι η υφαλμύριση δεν προέρχεται από σύγχρονες (σημερινές) εισροές θαλασσινού νερού, αλλά οφείλεται σε νερά της λίμνης, εμπλουτισμένα σε άλατα λόγω της συνεχούς εξάτμισης, τα οποία συγκεντρώθηκαν στον πυθμένα της λίμνης και εγκλωβίστηκαν μέσα στα μάρμαρα και στις προσχώσεις που τα κάλυψαν. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως στο νότιο τμήμα της λεκάνης. Πολλές από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις έχουν διαπεράσει τόσο τις προσχώσεις, όσο και τα υποκείμενα μάρμαρα, με αποτέλεσμα να υπάρχει επικοινωνία σήμερα μεταξύ των προσχωσιγενών σχηματισμών και των καρστικών υδροφόρων οριζόντων. Έτσι είναι πολύ δύσκολο να εξακριβωθεί εάν υπάρχει ποιοτική διαφορά μεταξύ των νερών των δύο τύπων υδροφόρου ορίζοντα. Στο νοτιοδυτικό τμήμα της λεκάνης, στην περιοχή του Ριζόμυλου, φαίνεται ότι δεν έφθαναν τα υφάλμυρα νερά της λίμνης Κάρλας. Εδώ οι προσχώσεις έχουν πάχος που φθάνει τα 300 m, ενώ βαθύτερα υπάρχουν μάρμαρα και σχιστόλιθοι ή γνεύσιοι, που αποτελούν το βραχώδες υπόβαθρο της λεκάνης. Οι σχηματισμοί του υποβάθρου αναδύονται στην επιφάνεια στην ορεινή περιοχή που περιβάλλει την πεδιάδα. Στην περιοχή αυτή η ποιότητα των υπογείων νερών είναι πολύ καλή.

5.5. Υδρογεωλογία

5.5.1. Υδροφόροι σχηματισμοί

Στην περιοχή της Κάρλας διακρίνονται τρεις κύριοι υδροφόροι σχηματισμοί: οι **αργιλοαμμώδεις λιμναίες αποθέσεις**, οι **αδρομερείς προσχώσεις και κορήματα** και τα **μάρμαρα** (Υποστηρικτική Υδρογεωλογική Μελέτη, 1999). Συνήθως οι σχηματισμοί αυτοί διατάσσονται στον χώρο με την σειρά που αναφέρθηκαν, από την επιφάνεια του εδάφους προς τα μεγαλύτερα βάθη.

Μέσα στους υδροφόρους σχηματισμούς, που αναφέρθηκαν παραπάνω, σχηματίζονται αντίστοιχα οι τρεις βασικοί υδροφόροι ορίζοντες:

- α) Ο υδροφόρος ορίζοντας των αργιλοαμμωδών λιμναίων αποθέσεων
- β) Ο υδροφόρος ορίζοντας των αδρομερών κροκαλολατυποπαγών και
- γ) ο υδροφόρος ορίζοντας των μαρμάρων (καρστικός).

Οι τρεις παραπάνω υδροφόροι ορίζοντες είναι τοποθετημένοι ο ένας επάνω στον άλλο (επάλληλοι ορίζοντες). Δεν συναντώνται σε όλες τις περιοχές της Κάρλας, αλλά από ορισμένες περιοχές είναι δυνατόν να απουσιάζει κάποιος ορίζοντας (όπως π.χ. ο καρστικός). Η έκταση των τριών υδροφόρων οριζόντων, το πάχος των υδροφόρων στρωμάτων και το βάθος τους από την επιφάνεια του εδάφους δεν είναι ομοιόμορφα σε όλη την έκταση του πεδινού τμήματος της Κάρλας. Παρατηρούνται, κατά την οριζόντια και κατακόρυφη έννοια μεγάλες διαφοροποιήσεις από περιοχή σε περιοχή, οι οποίες μας υποχρεώνουν να υποδιαιρέσουμε την ευρύτερη περιοχή σε ζώνες, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Οι **Αργιλοαμμώδεις Λιμναίες Αποθέσεις** αποτέθηκαν στον πυθμένα της λίμνης Κάρλας, στο πρόσφατο παρελθόν. Πρόκειται για προσχώσεις που περιέχουν αργίλους με ενδιαστρώσεις άμμων και λεπτών κροκάλων. Το στρώμα αυτό καλύπτει τον πυθμένα της αποξηραμένης λίμνης, έχει πάχος της τάξης των 80 - 100 μ. τουλάχιστον και καταλαμβάνει ολόκληρη την έκταση της λίμνης Κάρλας, προεκτεινόμενο και νοτιοδυτικά του Στεφανοβικείου, μέχρι το Βελεστίνο. Τα υλικά που σχημάτισαν το στρώμα αυτό φαίνεται ότι προήλθαν από τα βόρεια και δυτικά, από την αποσάθρωση των Πλειο-πλειστοκαινικών σχηματισμών της λεκάνης της Θεσσαλίας. Η περατότητα του στρώματος των αργιλικών επιφανειακών προσχώσεων δεν είναι μεγάλη, όπως διαπιστώθηκε από πλήθος ερευνητικών γεωτρήσεων. Ο υδροφόρος ορίζοντας των αργιλοαμμωδών λιμναίων αποθέσεων είναι επιφανειακός (φρεατικός). Η τροφοδοσία του υδροφόρου ορίζοντα γίνεται από τις βροχοπτώσεις και τις διηθήσεις από τα κανάλια. Η ποιότητα του νερού είναι καλή ή μέτρια, ανάλογα με την περιοχή, διότι πολλά από τα επιφανειακά εδάφη της λίμνης παλαιότερα ήταν αλμυρά. Ίσως, με την πάροδο του χρόνου, η κατάσταση να βελτιωθεί, διότι τα εδάφη αποπλένονται και απομακρύνονται τα άλατα.

Οι **Αδρομερείς προσχώσεις και τα κορήματα** βρίσκονται κάτω από το αργιλοαμμώδες στρώμα, με μεταβλητό πάχος εξαρτώμενο από το βάθος του παλαιοαναγλύφου της λεκάνης. Οι σχηματισμοί αυτοί δημιουργήθηκαν παλαιότερα, στις πλαγιές και το κατώτερο τμήμα των κοιλάδων. Πρόκειται για μεγάλες κροκάλες ή λατύπες, χαλίκια, άμμους και αργίλους, που προέρχονται από τη διάβρωση και αποσάθρωση των σχιστόλιθων των περιφερειακών ορεινών όγκων. Τα υλικά αυτά μεταφέρθηκαν από τους χείμαρρους και αποτέθηκαν στον πυθμένα της λεκάνης, σε παλαιότερες εποχές, όταν το ανάγλυφο ήταν εντονότερο, δηλαδή συγχρόνως με την καταβύθιση της περιοχής. Οι κώνοι κορημάτων, λόγω των αδρομερών υλικών που περιέχουν και της έλλειψης σημαντικού ποσοστού αργίλου, εμφανίζουν μεγάλη περατότητα. Όπως έδειξαν τα αποτελέσματα ορισμένων γεωτρήσεων, καθώς και οι γεωφυσικές έρευνες, που έχουν γίνει στο παρελθόν, οι αδρομερείς αποθέσεις επεκτείνονται πέραν των κρασπέδων της λεκάνης προς το κέντρο της, σχηματίζοντας ένα στρώμα μεταξύ αργιλοαμμωδών αποθέσεων και των μαρμάρων του υποβάθρου. Η περατότητα του στρώματος των αδρομερών προσχώσεων είναι σημαντική. Οι γεωτρήσεις, που εκμεταλλεύθηκαν τον υδροφόρο ορίζοντα αυτού του στρώματος απέδωσαν αρχικά πολύ υψηλές παροχές, μεγαλύτερες από 250 m³/h, με μικρή πτώση στάθμης. Δεν έχει εξακριβωθεί η υδραυλική επικοινωνία με τον υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα των μαρμάρων. Οι υψηλές αυτές παροχές οφείλονται επίσης στο γεγονός ότι αρχικά οι υδροφόροι ορίζοντες ήταν υπό πίεση και μπορούσαν να απελευθερώσουν μεγάλες ποσότητες νερού. Με την πάροδο όμως του χρόνου, επειδή το υδατικό ισοζύγιο έγινε αρνητικό, τα φορτία έπεσαν και ο υδροφόρος ορίζοντας μεταβλήθηκε σε ελεύθερο. Ο υδροφόρος ορίζοντας των αδρομερών κροκαλολατυποπαγών συναντάται σε βάθη άνω των 25 – 50 m. Έχει υψηλή περατότητα και καλή ποιότητα νερού. Η τροφοδοσία του γίνεται πλευρικά, μέσω των κώνων των κορημάτων και των χειμάρρων της περιοχής. Λόγω της έντονης τροφοδοσίας και της συνεχούς ανανέωσης του υπόγειου νερού, ο υδροφόρος ορίζοντας αυτός έχει νερό πολύ καλής ποιότητας.

Τα **Μάρμαρα** είναι υδροπερατά πετρώματα. Το ασβεστολιθικό υλικό, από το οποίο αποτελούνται, είναι ευδιάλυτο στο νερό, με αποτέλεσμα το βρόχινο νερό που εισχωρεί στις ρωγμές του πετρώματος, να τις διευρύνει συνεχώς και να προσδίνει τελικά στο πέτρωμα μεγάλη περατότητα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται καρστικοποίηση ή καρστ. Η Κάρλα, στην ανατολική πλευρά της έρχεται σε επαφή με μάρμαρα στις πλαγιές του Μαυροβουνίου Όρους. Παλαιότερα, τα νερά της, μη μπορώντας να διαφύγουν επιφανειακά προς τη θάλασσα, διοχετεύονταν προς τον εξωτερικό χώρο, υπογείως, μέσω καταβόθρων, που είχαν δημιουργηθεί στα μάρμαρα. Οι καταβόθρες διακρίνονται και σήμερα στην ανατολική πλευρά της. Η συνολική επιφάνεια των μαρμάρων που βρίσκονται μέσα στα όρια της λεκάνης της Κάρλας, στο ορεινό της τμήμα, ανέρχεται σε 96,3 Km². Εκτός όμως από την περιφέρεια της λεκάνης, μάρμαρα υπάρχουν και κάτω από τις προσχώσεις. Τα στρώματα αυτά αποτελούν προεκτάσεις των περιφερειακών εμφανίσεων και σχηματίζουν το υπόβαθρο της λεκάνης στον ανατολικό και νότιο τομέα. Μέσα σ' αυτά αναπτύσσεται καρστικός υδροφόρος ορίζοντας. Το πάχος των μαρμάρων κυμαίνεται από 20 έως 200 m.

5.5.2. Υδροφορία προσχωματικού και πεδινού τμήματος της Κάρλας

Στην ευρύτερη περιοχή της παλιάς λίμνης, αναπτύσσεται ένας συνεχής ανώτερος ορίζοντας άμμων και αργίλων κυμαινόμενου πάχους από 50-100 m, που επικάθεται πάνω σε πλέον αδρόκοκκα υλικά. Στα νότια τμήματα του ταμιευτήρα, κοντά στα κράσπεδα των μαρμάρων, το πάχος αυτό είναι σχετικά μικρότερο και φθάνει μέχρι τα 60 m. Κάτω από το επιφανειακό αυτό στρώμα αναπτύσσονται εναλλαγές αδρομερών με λεπτόκοκκους ορίζοντες υλικών. Στο νοτιοανατολικό τμήμα της πεδινής έκτασης, οι αδρομερείς αυτοί ορίζοντες ελαττώνονται σε πάχος και εδώ (παλιά λίμνη Κάρλας) κυριαρχούν, με μικρές εξαιρέσεις, τα αργιλοίλυδα στρώματα.

Στα νότια περιθώρια της λίμνης Κάρλας, κοντά στην περιοχή διάνοιξης της αποστραγγιστικής σήραγγας, οι γεωτρήσεις κάτω από τα αργιλοίλυδα επιφανειακά υλικά έχουν εντοπίσει μεγάλου πάχους κροκαλοατυποπαγείς αποθέσεις, **η υδροφορία των οποίων δεν πρέπει να βρίσκεται σε άμεση επικοινωνία με αυτή των μαρμάρων, όπως προκύπτει από τα παλιότερα γεωτρητικά δεδομένα.** Η εκεί απόθεση των αδρομερών αυτών υλικών πρέπει να συνδέεται με τα πρώτα στάδια πλήρωσης της τεκτονικής τάφρου από τους περιβάλλοντες ορεινούς όγκους. Κατά τη φάση διάνοιξης της γεώτρησης SR79 (περί τα 2 Km BA της εισόδου της σήραγγας) συναντήθηκαν οι αδρομερείς αυτές αποθέσεις και παρατηρήθηκε αρτεσιανισμός, **που υποδηλώνει τη δυσκολία αποστράγγισης των προσχωματικών υδροφοριών στους διπλανούς ευρισκόμενους καρστικούς,** η στάθμη στους οποίους ήταν πολύ χαμηλότερη όπως προκύπτει από παρατηρήσεις στην γεώτρηση 8K64 που διέτρησε το καρστ (10/73 SR79: +44,24, SR64: +14,64). Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των αλλούβιων της ευρύτερης περιοχής της Κάρλας είναι η ύπαρξη κατά θέσεις, αλατούχων αργίλων και λεπτόκοκκων άμμων, οι οποίοι επιβαρύνουν τα υπόγεια νερά με χλωριόντα. Η αυξημένη αυτή αλατότητα των υπογείων νερών δεν έχει σχέση με τη θάλασσα, αλλά οφείλεται στη διάλυση των αλατούχων εδαφών της παλιάς λίμνης. Στο τμήμα αυτό της

πεδιάδας δύο είναι οι κύριες ζώνες όπου εντοπίζεται σχετικό υδρογεωλογικό ενδιαφέρον: οι περιοχές Χάλκης και Αρμενίου –Στεφανοβίκειου - Ριζόμυλου. Στις περιοχές αυτές, οι οποίες βρίσκονται πλησιέστερα προς την κύρια πηγή τροφοδοσίας των πλέον αδρομερών αποθέσεων (κώνοι χειμάρρων - κορήματα), συναντώνται υδροφόρα στρώματα που αποτελούνται από άμμους και χαλίκια εντός των αργιλικών αποθέσεων. Στις ζώνες αυτές, αναπτύσσεται επίσης και το μεγαλύτερο πάχος των συγχρόνων αποθέσεων που στη μεν Χάλκη ξεπερνά τα 550 m, στη δε ζώνη Αρμενίου - Στεφανοβίκειου Ριζόμυλου τα 280 m.

5.5.3. Τροφοδοσία - Πιεζομετρία

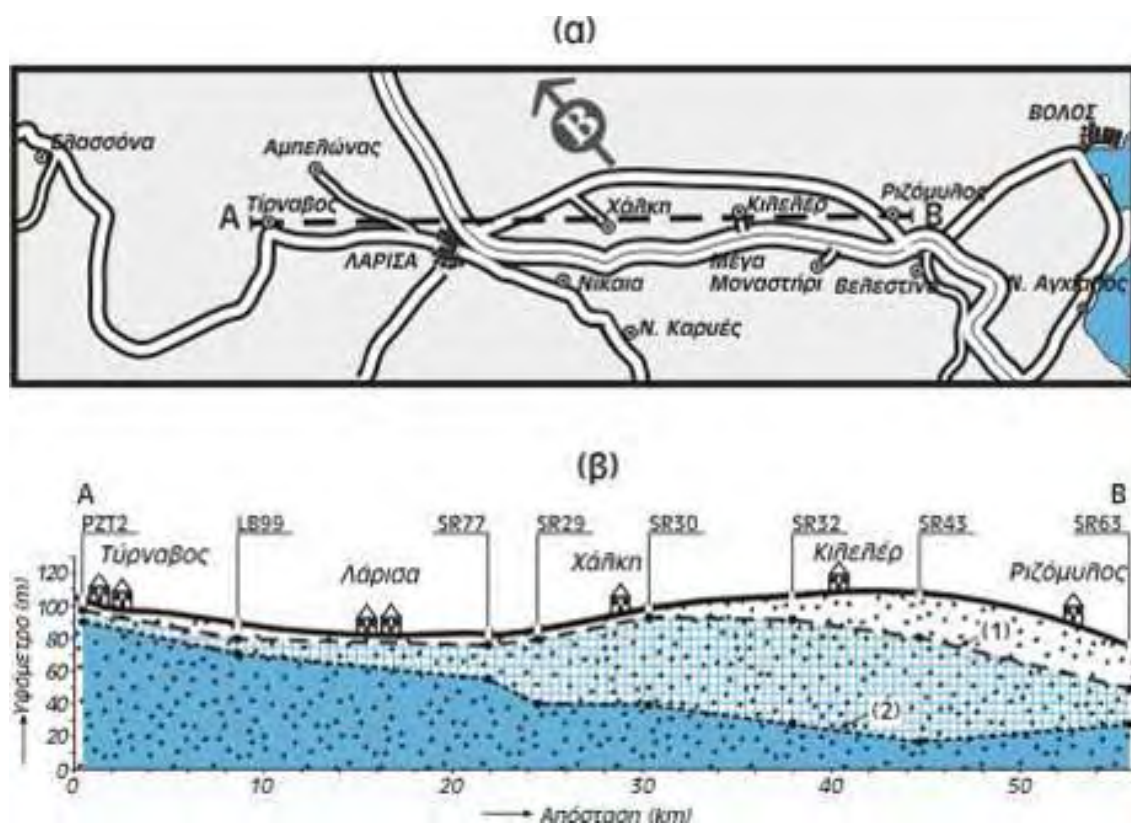
Η τροφοδοσία των υδροφορέων της ευρύτερης περιοχής Κάρλας είναι μικρή και πραγματοποιείται με δυσκολία από:

- την πλευρική τροφοδοσία των πλειοκαινικών λόφων και
- τους κώνους που σχηματίζουν οι μικροί χείμαρροι στα δυτικά και ανατολικά για το υπόλοιπο της πεδιάδας (Κουσμπασανιώτης, Ξεριάς, κλπ.).

Η τροφοδοσία από τη βροχή που πέφτει κατ' ευθείαν στο επιφανειακό ανάπτυγμα δεν είναι σημαντική εξ' αιτίας του μικρού συντελεστή κατείσδυσης στα λεπτόκοκκα επιφανειακά αλλούβια. Η δυσκολία οφείλεται στη μείωση της διαπερατότητας, και συνεπώς της διαβιβαστικότητας των υλικών των κώνων και των πλευρικών κορημάτων προς το πεδινό τμήμα αλλά και στην αύξηση της ετερογένειας του υλικού με συνεχείς ουσιαστικές παρεμβολές αργιλικών στρωμάτων. Από τις μέχρι τώρα υδρογεωλογικές έρευνες στην περιοχή (SOGREAH, 1974), η υπόγεια υδροφορία του προσχωματικού πεδίου έχει μια γενική διεύθυνση ροής από τα ΝΔ προς τα ΒΑ - Α. Πριν τη μεγάλη ανάπτυξη των εκμεταλλεύσεων των υπόγειων νερών, στο ύψος της γραμμής Αρμενίου - Σωτηρίου -Στεφανοβικείου εμφανίζονταν πηγές μέσα στις προσχώσεις σε υψόμετρα από 55 έως 60 m. Οι πηγές αυτές ήταν αποτέλεσμα της δυσκολίας υπόγειας μετακίνησης τμήματος των υπογείων νερών, λόγω ανάπτυξης ανατολικότερα των πλέον λεπτομερών αργιλοίλυδων ιζημάτων της πεδιάδας. Οι ανεπτυγμένοι καρστικοί σχηματισμοί που περιβάλλουν τα νοτιοανατολικά περιθώρια της πεδιάδας, δεν τροφοδοτούν τις υδροφορίες των αλλούβιων. Εδώ, ένα μέρος των νερών των σύγχρονων αποθέσεων μεταγγίζεται με υπερχειλίση (βραδέως) μέσα στην ακόρεστη ζώνη του καρστ, το οποίο κανονικά έχει εδώ χαμηλότερη πιεζομετρία και συνεπώς αποστραγγίζεται μαζί με τα καρστικά νερά προς τη θάλασσα.

Οι υπόγειες προσχωματικές υδροφορίες που αναπτύσσονται στην ευρύτερη πεδινή περιοχή της Κάρλας βρίσκονται κάτω από καθεστώς υπερεκμετάλλευσης. Στην ευρύτερη περιοχή Αγ. Γεωργίου - Βελεστίνου - Ριζόμυλου και Στεφανοβικείου έχει αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων που κατασκευάστηκαν κατά το παρελθόν. Η εικόνα της παρουσίας πλούσιας υπόγειας υδροφορίας στην περιοχή είναι όμως πλασματική. Όπως προκύπτει από την επεξεργασία όλων των πιεζομέτρων των προσχωματικών υδροφοριών, με εξαίρεση αυτών που είναι τοποθετημένα στα επιφανειακά στρώματα, υπάρχει συνεχής συστηματική και έντονη ταπείνωση της

υπόγειας στάθμης χρόνο με το χρόνο. Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται μια τομή της Αν. Θεσσαλίας από τον Τύρναβο ως το Ριζόμυλο (Σχήμα 5.9α), καθώς και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα για τα έτη 1973 και 2003 (Σχήμα 5.9β). Η ταπείνωση στη λεκάνη της Κάρλας είναι αρκετά σημαντική.



Σχήμα 5. 9. Τομή ΑΒ στην ανατολική Θεσσαλία, στην οποία φαίνεται (1): η ανώτατη ετήσια στάθμη του έτους 1973 και (2): η ανώτατη ετήσια στάθμη του 2003. PZT, LB, SR κ.λπ.: θέσεις πιεζομετρικών γεωτρήσεων παρατήρησης (Ευαγγελόπουλος, 2003)

Η ταπείνωση αυτή οφείλεται στις μεγάλες ποσότητες αντλούμενων νερών έναντι της ελλιπούς τροφοδοσίας και επαναπλήρωσης των υδροφορέων στο σύνολό τους. Η κατάσταση αυτή δεν επιτρέπει περαιτέρω αύξηση των εκμεταλλεύσεων, αλλά αντίθετα απαιτεί μεγάλη μείωση αυτών. Η εκτίμηση αυτή βασίσθηκε στην επεξεργασία των υπαρχουσών περιοδικών - και αξιόπιστων γενικά - μετρήσεων της πιεζομετρικής στάθμης των υδροφορέων που πραγματοποιούσε η Υ.Ε.Β. κάθε μήνα σε 40 γεωτρήσεις και πιεζόμετρα στον χώρο της ευρύτερης πεδινής περιοχής της Κάρλας. Οι περιοδικές αυτές μετρήσεις παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.4 και οι θέσεις τους φαίνονται στον χάρτη του Σχήματος 5.10. Εξαιτίας της έντονης πτώσης στάθμης που παρατηρείται στα πιεζόμετρα του προσχωματικού πεδίου, υπάρχει το ενδεχόμενο τοπικά η γενική αυτή κίνηση του υπόγειου νερού να αντιστραφεί και να προκύψει ροή κατά θέσεις του νερού του καρστ προς τις προσχώσεις. Η άποψη αυτή που διατυπώνεται τελευταία δεν είναι δυνατόν σήμερα να τεκμηριωθεί αξιόπιστα. Στην περιοχή των νοτίων καρστικών κρασπέδων της ευρύτερης πεδινής ζώνης της Κάρλας (περιοχή σήραγγας - Ριζόμυλου - Αγ. Γεωργίου) δεν υπάρχουν συνεχείς πιεζομετρικές παρατηρήσεις της διακύμανσης στάθμης των καρστικών υδροφοριών σε αντίθεση με τα

βορειοανατολικά όρια της τέως λίμνης (περιοχή Καναλίων - Καλαμακίου). Στα νότια κράσπεδα, υπάρχουν μόνο στοιχεία κατά τη διάνοιξη των γεωτρήσεων κατά το παρελθόν, που έχουν διατρήσει τα εκεί αναπτυσσόμενα μάρμαρα. Οι αρδευτικές γεωτρήσεις SR63 και SR64 (περιοχή σήραγγας), που κατασκευάστηκαν το 1973-74 και έχουν διατρήσει μάρμαρα, είχαν συναντήσει την υπόγεια υδροφορία σε απόλυτα υψόμετρα +17,07 (3/74) και +14,64 (10/73) αντίστοιχα. Αντίθετα, η γεώτρηση SR79 (2 Km BA στομίου σήραγγας), που συνάντησε κάτω από τις αργιλοϊλυώδεις αποθέσεις της λίμνης και σε βάθος από 100-283 κροκαλοπαγή, παρουσίαζε αρτεσιανισμό και απόλυτο υψόμετρο στάθμης +44,24. Το γεγονός αυτό, της τόσο μεγάλης υψομετρικής διαφοράς της υπόγειας στάθμης σε κοντινή θέση από τα καρστικοποιημένα μάρμαρα, υποδεικνύει ανεξαρτησία μεταξύ των υπογείων υδροφοριών των σύγχρονων αποθέσεων και των μαρμάρων. Η υψηλή αυτή στάθμη υποδηλώνει δυσκολία και παρεμπόδιση αποστράγγισης της υδροφορίας των σύγχρονων αποθέσεων στο καρστ. Ακόμα και στην περίπτωση που σήμερα αυτή η σχέση έχει διαταραχθεί σε θέσεις κοντά στην επαφή των ανεξάρτητων υδροφοριών, η αντιστροφή της κατεύθυνσης της ροής του υπογείου νερού, από τα μάρμαρα προς τις σύγχρονες αποθέσεις, είναι πολύ δύσκολη και θα έχει μόνο τοπικό χαρακτήρα εξαιτίας της πολύ μεγάλης διαφοράς στη διαπερατότητα των δύο μέσων. Εξετάζοντας τις απόλυτες τιμές στάθμης των πιεζομέτρων των υδροφοριών των σύγχρονων αποθέσεων, παρατηρείται ότι κατά το τέλος της δεκαετία του '90, αυτές είναι χαμηλότερες κατά την περίοδο των αντλήσεων του +10 m, στη δε περίπτωση του πιεζομέτρου PZ15 η υπόγεια στάθμη λαμβάνει και αρνητικές τιμές. Στη συνέχεια οι τιμές αυτές επανέρχονται περίπου στο +15 m. Αν δεχθούμε ότι η στάθμη στο καρστ του νότιου κρασπέδου είναι περίπου στο +15 m με βάση παλιότερες παρατηρήσεις, προκύπτει ότι υπάρχουν χρονικές περίοδοι που η καρστική υδροφορία βρίσκεται ψηλότερα αυτής των σύγχρονων αποθέσεων. Στην περίπτωση όμως αυτή, η ροή νερού από το καρστ προς το εσωτερικό της πεδιάδας θα επηρεάσει μια πολύ μικρή ζώνη των αποθέσεων, λόγω της δυσκολίας πραγματοποίησής της εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς διαπερατότητας μεταξύ των δύο διακριτών υδροφορέων. Η μεγάλη τέλος πτώση στάθμης δεν παρατηρείται κυρίως στα περιθώρια της λεκάνης των σύγχρονων αποθέσεων, αλλά στα δυτικά όρια αυτής, όπου και τοποθετούνται οι κύριες ζώνες εντατικής εκμετάλλευσης. Στο Παράρτημα παρατίθεται πίνακας με τη συνολική χρονοσειρά των μετρήσεων της υπόγειας στάθμης.

Πίνακας 5. 4. Περιοδικές μετρήσεις στάθμης πιεζομέτρων ευρύτερης περιοχής Κάρλας

A/A	Πιεζόμετρο	Δήμος ή Κοινότητα	Περίοδος αντλήσεων	Συνολική ^{**} Πτώση στάθμης (m)
1	E3	Βελεστίνο	4/72 – 8/90	19.12
2	AG12α	Γλαύκη	9/79 – 12/97	0.31
3	Π6Λ	Ελευθέριο	6/74 – 11/98	-0.42
4	SR35	Ελευθέριο	11/72 – 11/98	0.27
5	402	Καλαμάκι	5/72 – 7/94	5.4
6	PZ64*	Καλαμάκι	2/80 – 4/98	6.55
7	SR68*	Καλαμάκι	9/76 – 11/98	2.23
8	LB202*	Καλαμάκι	8/79 – 11/98	3.95
9	PZ65*	Καλαμάκι	11/80 – 11/98	8.32
10	PZ45*	Καστρί	4/80 – 11/98	7.43
11	SR32	Κυνέλη	12/72 – 11/98	75.13

12	SR43	Κυψέλη	10/73 – 11/98	50.82
13	PZ68	Μ. Μοναστήρι	2/80 – 4/94	18.07
14	SR77	Μελισοχώρι	6/74 – 11/98	22.26
15	SR31	Μέλισσα	5/73 – 11/98	34.94
16	PZ67	Μέλισσα	3/80 – 11/98	10.58
17	AD11	Μοδεστός	12/72 – 11/98	37.43
18	PZ50	Νάματα	3/80 – 11/98	0.93
19	SR66	Νίκη	10/73 – 12/98	16.51
20	AG14	Νίκη	12/11/98	21
21	SR72	Ομορφοχώρι	1/74 – 11/98	27.63
22	SR60	Ομορφοχώρι	5/84 – 10/97	20.73
23	PZ7	Πλασιά	Σταθμηγράφος	7.29
24	PZ7α	Πλασιά	3/84 – 11/98	2.97
25	SR29	Πλατύκαμπος	12/72 – 11/98	34.7
26	SR63α	Ριζόμυλος	10/73 – 11/98	21.68
27	SR63b	Ριζόμυλος	10/73 – 11/98	18.65
28	AG17	Ριζόμυλος	9/93 - 11/98	
29	AG17α	Ριζόμυλος	12/72 – 8/96	49.69
30	PZ15	Στεφανοβίκειο	1/74 – 11/98	44.78
31	AD15α	Στεφανοβίκειο	12/72 – 4/94	
32	LB310	Στεφανοβίκειο	8/80 – 12/97	31.13
33	AD13	Στεφανοβίκειο	6/84 – 8/90	18.34
34	AD13α	Στεφανοβίκειο	12/72 – 11/98	6.03
35	AD15	Στεφανοβίκειο	6/84 – 4/90 και 12/97	4.79
36	AD16	Χάλκη	12/92 – 11/98	18.38
37	Π17Λ	Χάλκη	10/73 – 5/96	20.17
38	SR30	Χάλκη	12/72 – 11/98	37.81

* Πιεζόμετρα που αναφέρονται σε καρστικούς σχηματισμούς.

** Η πτώση στάθμης αναφέρεται στο μήνα Νοέμβριο της αρχικής μέτρησης μέχρι το Νοέμβριο της τελικής. Λαμβάνεται ο Νοέμβριος όπου η υπόγεια πιεζομετρία δεν βρίσκεται υπό την επίρεια των αντλήσεων και δεν έχει αρχίσει ακόμα η τροφοδοσία των υδροφοριών. APT(-), APT(+). Στη γεώτρηση υπήρχε αρτεσιανισμός που δεν παρατηρείται σήμερα APT(-) ή συνεχίζεται περιοδικά APT(+).

Από την επεξεργασία των μακροχρόνιων πιεζομετρικών παρατηρήσεων, (26 χρόνια περίπου) που πραγματοποιήθηκε (Σιδηρόπουλος, 2007), προκύπτει ότι οι υπόγειες υδροφορίες του ευρύτερου πεδινού τμήματος βρίσκονται υπό καθεστώς εντατικής υπερεκμετάλλευσης.

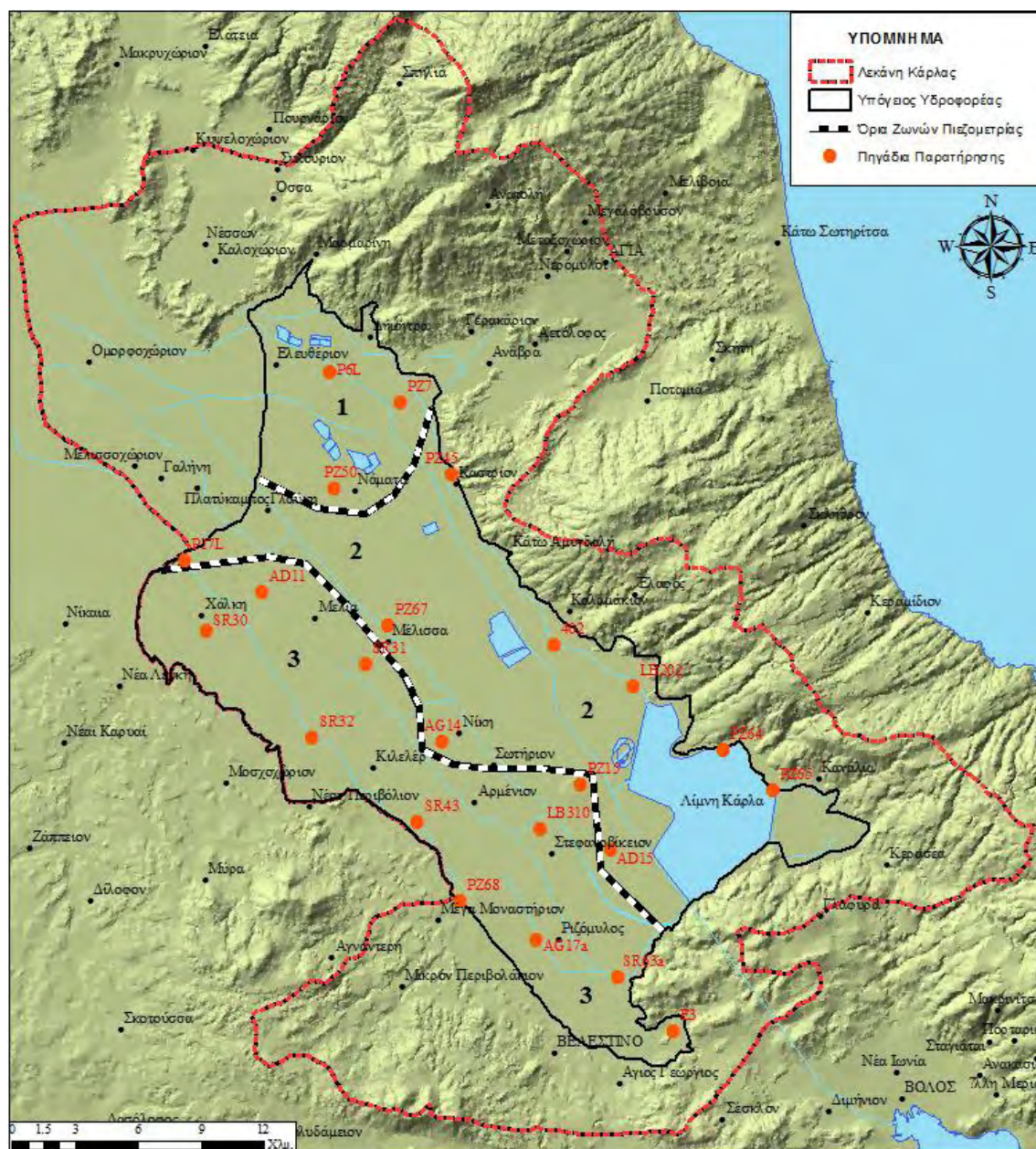
Διακρίνονται τρεις κύριες ομάδες πιεζόμετρων, ως προς τη μορφή ταπείνωσης της υπόγειας στάθμης:

- Στην **πρώτη ομάδα πιεζόμετρων** η ταπείνωση είναι μικρή και δεν ξεπερνά τα 10 m, με τάσεις σταθεροποίησης. Σε αυτή ανήκουν τα πιεζόμετρα PZ7, PZ50, P6L. Στις περιοχές τοποθέτησης των παραπάνω πιεζομέτρων (βόρειο τμήμα Κάρλας) δεν υπάρχουν προοπτικές αύξησης των αντλήσεων γιατί δεν αναπτύσσονται αξιόλογες υδροφορίες. Η περιοχή αυτή εξυπηρετείται από το δίκτυο του ΤΟΕΒ Πηνειού.
- Στη **δεύτερη ομάδα πιεζομέτρων** η ταπείνωση είναι μεγάλη, φτάνοντας τα 30 m στα τέλη της δεκαετίας του '90. Στην ομάδα αυτή ανήκουν τα πιεζόμετρα P17L, PZ67, PZ45, SR66, AG14, 402, LB202, PZ64, PZ65, AD15. Τα πιεζόμετρα αυτά τοποθετούνται στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα της Κάρλας (περιοχή Πλατύκαμπος – Μέλισσα – Σωτήριο-Κανάλια). Στις περιοχές αυτές οι

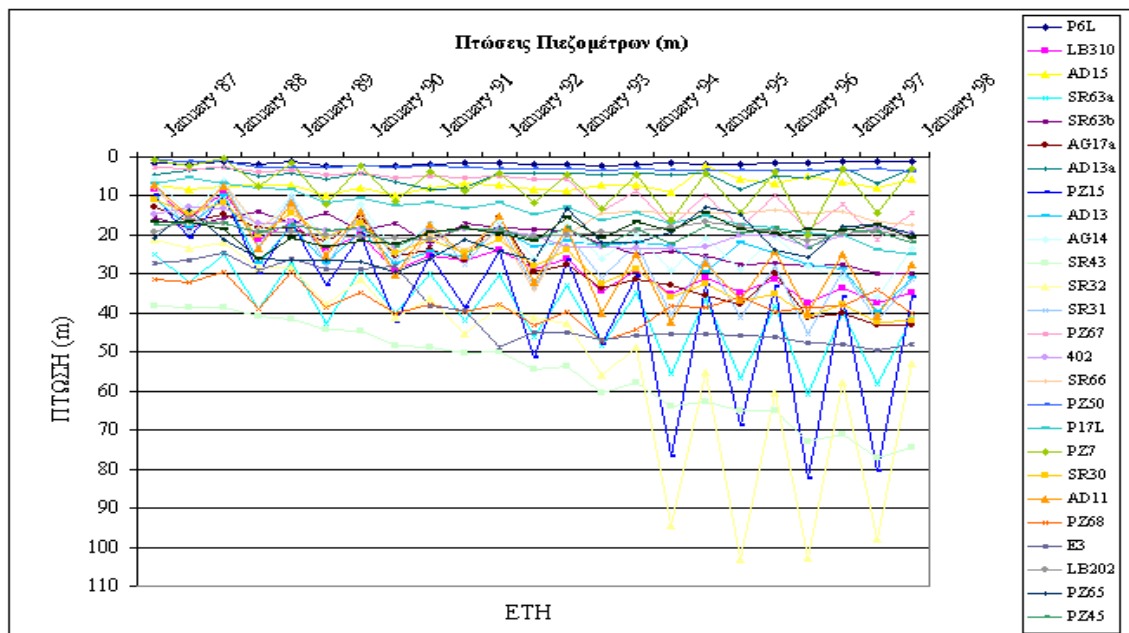
υπόγειες υδροφορίες βρίσκονται υπό καθεστώς υπερεκμετάλλευσης, αν και ένα τμήμα τους (βόρειοανατολικό) εξυπηρετείται από το δίκτυο του ΤΟΕΒ Πηνειού

- Στην **τρίτη ομάδα πιεζομέτρων** η ταπείνωση είναι μεγάλη και έντονη, χωρίς τάσεις σταθεροποίησης. Στην ομάδα αυτή ανήκουν τα πιεζόμετρα SR30, AD11, SR32, SR43, LB310, PZ68, AG17a, SR63a, E3. Τα πιεζόμετρα αυτά τοποθετούνται στο δυτικό και νοτιοδυτικό τμήμα της πεδινής έκτασης, όπου αναπτύσσονται και οι κύριες αξιόλογες υδροφορίες της Χάλκης και της περιοχής Αρμενίου –Στεφανοβικείου – Ριζόμυλου – Βελεστίου – Αγ. Γεωργίου.

Στο χάρτη του Σχήματος 5.10 απεικονίζεται η θέση της κάθε ομάδας πιεζομέτρων και στο γράφημα του Σχήματος 5.11 οι πτώσεις στάθμης των πιεζομέτρων από το 1987 ως το 1998.



Σχήμα 5. 10. Θέσεις πηγαδιών παρατήρησης και όρια των ζωνών πιεζομετρίας



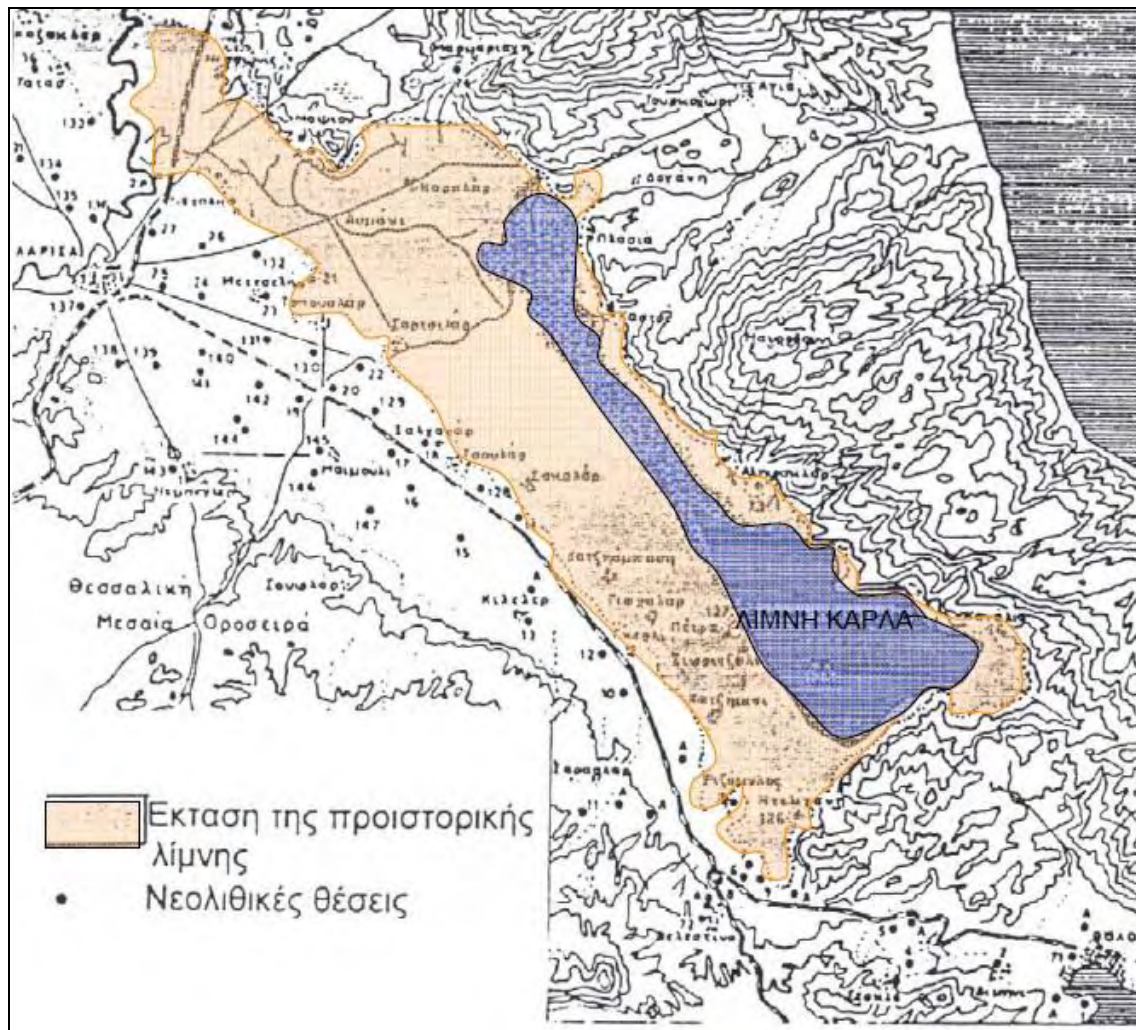
Σχήμα 5. 11. Διάγραμμα της πτώσης στάθμης των πηγαδιών παρατήρησης

5.6. Η λίμνη Κάρλα

Η λίμνη Κάρλα, η αρχαία Βοιβήϊς, υπήρξε μία από τις μεγαλύτερες και οικολογικά σημαντικότερες λίμνες της Ελλάδας, με πλούσιο ιχθυοπληθυσμό, πάνω στον οποίο στηρίχθηκε το εμπόριο της αλιείας από τους κατοίκους των παρακάρλιων οικισμών. Αποτελούσε έναν από τους σημαντικότερους σταθμούς των μεταναστευτικών πουλιών για την Ελλάδα και καθιστούσε την ευρύτερη περιοχή πλούσια από υδρολογική άποψη.

Η δημιουργία της οφείλεται στη βύθιση της Αιγαίδας και στον σχηματισμό του Αιγαίου Πελάγους. Τα τελευταία 500000 χρόνια, δηλαδή από το Πλειστόκαινο και μετά ξεκινά η περίοδος αποστράγγισης των θεσσαλικών βυθισμάτων προς το Θερμαϊκό. Η υποχώρηση των λιμνών διευκολύνει τη συνένωση των παραπόταμων του Πηνειού με την κύρια κοίτη, ενώ κατά τόπους παραμένουν λίμνες και έλη. Έτσι δημιουργείται η λίμνη Βοιβήϊδα στα χαμηλότερα υψόμετρα του κάμπου της ανατολικής Θεσσαλίας. Η τροφοδοσία της οφειλόταν στα πλημμυρικά νερά του Πηνειού, μέσω του ρέματος Ασμακίου (8T) και των απορροών των γύρω ορεινών όγκων, μιας και δεν υπήρχε επιφανειακή διαφυγή αυτών στη θάλασσα. Βρίσκονταν στους πρόποδες του όρους Μαυροβουνίου. Ήταν μια αβαθή λίμνη (2 – 5.5 m βάθος) και καταλάμβανε μία μέση έκταση 200000 στρεμμάτων, ενώ τα νεότερα χρόνια η έκταση της κυμαινόταν αναλόγως με τα πλημμυρικά νερά του Πηνειού και των απορροών των γύρω ορεινών όγκων. Η λίμνη οριοθετούνταν βορειοανατολικά από τις λοφώδεις εξάρσεις της οροσειράς Μαυροβουνίου, νότια από τις λοφώδεις εξάρσεις της οροσειράς του Πηλίου, ενώ βορειοδυτικά, δυτικά έως νοτιοδυτικά δεν ήταν σαφή τα όρια. Αρχαιολογικές έρευνες αποδεικνύουν την ύπαρξη παρακάρλιων πολιτισμών πέριξ αυτής. Ένας Γάλλος αρχαιολόγος, ο Grundmann (Παληκαρίδου, 1998), κατά την έρευνα του για τους αρχαιολογικούς παρακάρλιους οικισμούς, στα τέλη της δεκαετίας του '30, απεικόνισε σε χάρτη τα όρια τόσο της προϊστορικής λίμνης, όσο και τα αντίστοιχα εκείνης της

εποχής, όπως παρουσιάζεται Σχήμα 5.12. Η προϊστορική έκταση αναπαριστάται με πορτοκαλί χρώμα, ενώ η αντίστοιχη εκείνης της εποχής με μπλε σκούρο.



Σχήμα 5. 12. Σκαρίωμα της προϊστορικής και σύγχρονης έκτασης της τέως λίμνης Κάρλας.

Η καταγραφή της στάθμης ξεκίνησε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα και ήταν χαρακτηριστική η αυξομειώσή της. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως κύρια πηγή τροφοδοσίας της ήταν ο Πηνειός. Έτσι σε χρονιές ανομβρίας η λίμνη είχε αποξηρανθεί τελείως. Σύμφωνα με καταγραφές αποξηράνθηκε δύο φορές το διάστημα 1860-1880 και από τότε άλλες δύο τον Ιούλιο του 1899 και το 1908. Η τελική της αποξήρανση, η οποία ήταν τεχνητή έγινε το 1962, μέσω της σήραγγας της Κάρλας. Στον Πίνακα 5.5 παρατίθενται η στάθμη και η έκταση της λίμνης για την περίοδο 1907-1953 (Ananiadis, 1956).

Πίνακας 5. 5. Υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας και έκταση τη λίμνης για την περίοδο 1907-1959 (Ananiadis, 1956)

ΕΤΟΣ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ (m)		ΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ (Km ²)	
	ΜΕΓΙΣΤΟ	ΕΛΑΧΙΣΤΟ	ΜΕΓΙΣΤΟ	ΕΛΑΧΙΣΤΟ
1907-1910	45.80	44.72	72.5	44.7
1921	50.10	-	179	-
1931	49.18	48.28	152	128.9
1932	49.13	-	150.1	-
1938-1939	48.50	47.30	155	107.5
1949	45.80	45.13	72.5	54.4
1950	45.05	44.71	68.3	41.3
1951	45.81	44.98	72.8	50.8
1952	46.34	45.45	85.5	63.3
1953	45.85	45.15	74.8	63.3
1954	46.85	45.45	-	-
1956	47.65	46.85	115	-
1957	47.05	46.35	-	-
1958	46.70	45.89	-	-
1959	46.00	-	-	-

Η αεροφωτογραφία του Σχήματος 5.13, η οποία παραχωρήθηκε από τη Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού αποθανατίζει τη λίμνη Κάρλα το 1945, η έκταση της οποίας εκτιμάται στα 78.35 Km². Η πολύτιμη συνεισφορά της λίμνης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί γενικά στα κάτωθι:

- απομάκρυνση των θρεπτικών στοιχείων
- παγίδευση των πλημμυρικών νερών
- εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφορέων
- αποθήκευση του νερού στην επιφάνεια της λίμνης και υπογείως για άρδευση
- κατακράτηση των ιζημάτων και των τοξικών ουσιών
- αποθήκευση και ελευθέρωση της θερμότητας
- δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας
- στήριξη των τροφικών αλυσίδων



Σχήμα 5. 13. Αεροφωτογραφίας της τέως λίμνης Κάρλας από τη Γ.Υ.Σ. το 1945

5.6.1. Αποξήρανση της λίμνης Κάρλας

Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα, είχε επικρατήσει η τεχνοκρατική αντίληψη των αποξηράνσεων αρκετών λιμνών, υγροτόπων και βάλτων σε όλη την Ελλάδα (Κωπαΐδα, έλος Γιαννιτσών, πεδιάδα Σερρών), χωρίς καμιά περιβαλλοντική και οικολογική μέριμνα, μιας και τα κίνητρα ήταν η διάθεση γης για την ανάπτυξη της γεωργίας. Έτσι στο στόχαστρο μπήκε και η λίμνη Κάρλα, της οποίας η αποξήρανση ξεκίνησε το 1962 και ολοκληρώθηκε το 1964, με την κατασκευή μιας σειράς έργων και για τους εξής βασικούς λόγους:

- Αποφυγή των πλημμυρικών φαινομένων που δημιουργούσε η λίμνη εξαιτίας της διαρκώς μεταβαλλόμενης έκτασής της
- Αντιμετώπιση σχετικών με τη λίμνη ασθενειών, όπως ελονοσία
- Απόκτηση γεωργικής γης και διάθεσή της σε ντόπιους και πρόσφυγες

Η αποξήρανση της Κάρλας οδήγησε στην αύξηση του εισοδήματος από την παραγωγή στην πεδιάδα της Κάρλας, όχι μόνο λόγω της αύξησης στις καλλιεργούμενες περιοχές και της μείωσης στη ζημία πλημμυρών αλλά ακόμα λόγω της ενδυνάμωσης των αγροοικοσυστημάτων. Η αύξηση αυτή όμως δεν κράτησε για αρκετό χρονικό διάστημα. Η άρδευση επεκτάθηκε σχεδόν σε όλες τις καλλιεργούμενες εκτάσεις. Το νερό άρδευσης προήλθε από τις βαθιές γεωτρήσεις. Όλοι οι ψαράδες έχασαν τις εργασίες τους. Οι σταθερές πτώσεις της στάθμης των υπόγειων νερών, είχαν ως αποτέλεσμα, το υψηλής ποιότητας νερό άρδευσης που προερχόνταν από τις γεωτρήσεις να συμπληρώνεται από χαμηλής ποιότητας νερό που προέρχονταν από υδραντλίες που το απορροφούσαν από τον μικρό υγρότοπο και από τις διάφορες τάφρους κατά την περίοδο του καλοκαιριού. Η άντληση ήταν ανεξέλεγκτη. Τα αγροοικοσυστήματα έχασαν την ποικιλία καλλιεργειών. Τα προβλήματα αλατότητας των εδαφών έθεταν δυσκολίες λόγω της έλλειψης νερού. Η ζημία λόγω παγετού στις καλλιέργειες αυξανόταν και οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις στη Λάρισα διοχέτευαν μεγάλους όγκους μη επεξεργασμένων αποβλήτων στις αποχετευτικές τάφρους (Zalidis and Gerakis 1999). Οι πιο σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις από την αποξήρανση της λίμνης είναι:

- σημαντική υποβάθμιση της υδρόβιας βλάστησης και του ιχθυοπληθυσμού και απουσία μεταναστευτικών και παρυδάτιων πουλιών
- υποβάθμιση της αισθητικής του τοπίου
- εξάντληση των αποθεμάτων του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα λόγω υπεράντλησης για κάλυψη των αρδευτικών απαιτήσεων
- επιβάρυνση της ποιότητας των υπογείων νερών λόγω εντατικοποίησης των γεωργικών εκμεταλλεύσεων στην περιοχή της λίμνης
- αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα και την ποσότητα των επιφανειακών υδάτων
- επιπτώσεις στην ποιότητα των νερών του Παγασητικού Κόλπου, ο οποίος δεχόταν το σύνολο του ρυπαντικού φορτίου από την περιοχή της Κάρλας
- υποβάθμιση της ποιότητας των εδαφικών πόρων (ρηγματώσεις, καθιζήσεις, παθογενή εδάφη, κλπ),
- εξαφάνιση της αλιείας, ενός τομέα εξαιρετικά δυναμικού στην περιοχή
- εμφάνιση πληθυσμιακής συρρίκνωσης των ασθενέστερων οικονομικά οικισμών
- όξυνση των ακραίων κλιματικών φαινομένων
- εμφάνιση συχνών πλημμυρικών φαινομένων εξαιτίας της ανεπαρκούς παροχετευτικής ικανότητας της σήραγγας

Οι αλλαγές των λειτουργιών του υγρότοπου οδήγησαν σε ένα μεγάλο αριθμό περιβαλλοντικών προβλημάτων με αντίκτυπο στην οικονομία της περιοχής. Οι δείκτες

κοινωνικής ευμάρειας της περιοχής βρίσκονταν σε διαρκή πτωτική πορεία, η οποία οδήγησε σε τάσεις εγκατάλειψης της περιοχής.

5.6.2. Ιστορικό μελετών μέχρι την αποξήρανση

Η ιδέα περιορισμού της έκτασης των περιοδικών κατακλύσεων και η δημιουργία ταμιευτήρα με καθορισμένη έκταση σε τμήμα της παλιάς λίμνης Κάρλας, έχει εξεταστεί από εκατονταετίας, σε συνδυασμό με έργα αξιοποίησης της ευρύτερης πεδιάδας Λάρισας - Κάρλας. Αναφέρεται σε αρκετές μελέτες με την πρώτη να εκπονείται το 1887 από τη γαλλική κυβέρνηση, ενώ το 1889 εγκρίνεται δαπάνη του δημοσίου για έργα στη Θεσσαλία και ρυθμίζονται οι διατάξεις για τη διάθεση γης που θα γίνει καλλιεργήσιμη. Το 1897 χορηγούνται δάνεια για την εκτέλεση έργων στη Θεσσαλία, με μία επιτροπή να αναλαμβάνει τις εργασίες τοπογράφησης της περιοχής από το 1900 ως το 1910. Παράλληλα η επιτροπή εγκατέστησε 32 σταθμούς για βροχομετρικές και υδρομετρικές παρατηρήσεις. Τη διετία 1911-1913 η ιταλική κυβέρνηση υπέδειξε για μελέτη υδραυλικών έργων τον μηχανικό J. Nobile. Η πρώτη λύση περιελάμβανε έργα αποξήρανσης με σήραγγα εκροής, η οποία απαιτούσε μεγάλη δαπάνη σε σχέση με τα οφέληματα. Η δεύτερη λύση ήταν να σχηματιστεί συλλεκτήρια λεκάνη απορροής σε χαμηλότερη ζώνη όπου η εξάντληση των νερών θα γινόταν με φυσικό αλλά και τεχνητό τρόπο για άρδευση των χωραφιών που θα προέκυπταν από την αποστράγγιση. Το 1921 ο μηχανικός J. Jackson με τη μελέτη του υπέδειξε μια άλλη λύση για την αντιμετώπιση των πλημμυρών. Στη λύση αυτή τα νερά έπρεπε να συγκρατούνται σε τεχνητές λίμνες ανάσχεσης. Ένα ακόμη πρόβλημα για την περιοχή ήταν η χαρτογράφησης της που ήταν πλέον απαραίτητη για τη διανομή κλήρων σε κατοίκους των παρακάρλιων περιοχών και το 1927 γίνεται πραγματικότητα. Το 1934 η υπηρεσία του υπουργείου συγκοινωνίας επιτυγχάνει κυβερνητική απόφαση και πίστωση 8 εκ. δραχμ. για την αποξήρανση της Κάρλας και την περίοδο 1936-1941 γίνονται μικρά έργα χωρίς συντονισμό και τοπικού χαρακτήρα όπως τα έργα του χειμάρρου Κουσμπασανιώτη που έγιναν το 1938-1939 για την αντιπλημμυρική προστασία του Πλατυκάμπου. Το 1949-1950 η εταιρία BOOT κατασκευάζει διάφορα έργα, αναχώματα εγκιβωτισμού στον Πηνειό και τους συλλεκτήρες ορεινών υδάτων Σ1 και Σ5. Το 1951 γίνεται η διάνοιξη της τάφρου 1Τ. Το 1950-1951 το βάθος της λίμνης μειώθηκε στα 2 m. Με την κατασκευή αντιπλημμυρικών έργων μειώθηκαν οι εισροές υψηλής ποσότητας νερών στη λίμνη με αποτέλεσμα να υποβαθμιστούν τα νερά της. Το 1952 υλοποιούνται τοπογραφικό διάγραμμα και κτηματολογικός χάρτης της περιοχής. Το 1953-1954 ο μηχανικός Παπαδάκης μελέτησε και κατασκεύασε αρδευτικό και αποστραγγιστικό δίκτυο που θα αποτελούνταν από τάφρους και διώρυγες. Η λίμνη θα περιοριζόταν σε μια έκταση 64700 στρ. στο Ν.Α. τμήμα της (δεν προβλεπόταν ολική αποξήρανση, αλλά κατασκευή ταμιευτήρα). Στο δυτικό όριο της λίμνης θα γινόταν ανάχωμα για προστασία από υπερχειλίσσεις. Η λίμνη θα χρησίμευε για άρδευση με δίκτυο από διώρυγες και αρδευτικά κανάλια. Θα υπήρχε δυνατότητα τροφοδοσίας της λίμνης από τον Πηνειό. Τα αποστραγγίσματα της περιοχής θα εκκενώνονταν στον Παγασητικό μέσω αποχετευτικής σήραγγας. Δεν περιλαμβάνονταν έργα για τα χωριά Κανάλια, Κερασιά,

Βένετο, Κεραμίδι και Σκλήθρο που είχαν κατοχυρωμένα δικαιώματα αλιείας από την περίοδο της Τουρκοκρατίας σε όλη τη λίμνη. Το 1959 ανατέθηκε μελέτη από το υπουργείο Γεωργίας στον μηχανικό Νικολαΐδη για την αξιοποίηση της πεδιάδας της Κάρλας με δεδομένα την κατασκευή ταμιευτήρα 64700 στρεμμάτων, σήραγγας και τάφρων πεδινών υδάτων. Το 1961 με βάση τη μελέτη Νικολαΐδη γίνεται η διάνοιξη της σήραγγας Κάρλας από δύο μέτωπα από Έλληνες τεχνικούς με θαυμαστή ακρίβεια. Το 1962 γίνεται η ολική αποξήρανση της λίμνης και η κατασκευή των τάφρων 2Τ, 3Τ, 4Τ, 5Τ, 6Τ. Κατά την αποστράγγιση έγινε μελέτη και κατασκευή αποχετευτικών – αποστραγγιστικών δικτύων σε έκταση 185000 στρ. στην περιοχή Πλατυκάμπου.

Πίνακας 5. 6. Μελέτες αποξήρανσης της λίμνης Κάρλας

Έτος	Μελέτη	Μελετητές
1887	Πρώτη μελέτη αποξήρανσης για την περιοχή	Γαλλική Κυβέρνηση
1911-13	Μελέτη Υδραυλικών έργων	Ιταλός Μηχανικός J. Nobile
1920-1921	Εναλλακτική λύση αντιμετώπισης πλημμυρών	Μηχανικός J. Jackson
1953-1954	Μελέτη και κατασκευή αρδευτικού και αποστραγγιστικού δικτύου	Μηχανικός Παπαδάκης
1959	Μελέτη και κατασκευή ταμιευτήρα 64.700 στρεμμάτων, σήραγγας και τάφρων πεδινών υδάτων	N. Νικολαΐδης

5.6.3. Έργα αποξήρανσης της λίμνης Κάρλας

Το σύνολο των εγγειοβελτιωτικών έργων που κατασκευάσθηκαν κατά την αποξήρανση απαρτίζεται από έργα άρδευσης, αποστράγγισης και αντιπλημμυρικής προστασίας.

Αρδευτικά έργα

Τα αρδευτικά έργα περιλαμβάνουν δίκτυα άρδευσης, αποχέτευσης-στράγγισης και αγροτικής οδοποιίας στην ευρύτερη περιοχή μελέτης. Είναι απλά έργα που αποτελούν ατομικές ή ομαδικές προσπάθειες για άρδευση περιορισμένων εκτάσεων με τη χρησιμοποίηση νερού ιδιωτικών γεωτρήσεων ή γεωτρήσεων του Π.Α.Υ.Υ.Θ. (Περιβαλλοντική Αναπτυξιακή Υπηρεσία Υδάτων Θεσσαλίας) ή του νερού των αποχετευτικών και αποστραγγιστικών τάφρων. Επίσης χρησιμοποιείται το νερό των ταμιευτήρων άρδευσης που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.

Έργα αποστράγγισης και αντιπλημμυρικής προστασίας

Τα κυριότερα αποστραγγιστικά – αντιπλημμυρικά έργα που κατασκευάσθηκαν είναι τα αναχώματα του Πηνειού από τη Λάρισα μέχρι τη Γυρτώνη, οι συλλεκτήρες Σ1 και Σ5, οι τάφροι 1Τ, 2Τ, 3Τ, 4Τ, 5Τ, 6Τ, 7Τ και η Σήραγγα Κάρλας.

- Τάφρος 1Τ: Η τάφρος 1Τ είναι η κύρια αντιπλημμυρική τάφρος της Κάρλας, η οποία συλλέγει τα νερά των χαμηλών εκτάσεων της ανατολικής πεδιάδας και τα κατευθύνει στη σήραγγα της Κάρλας. Ξεκινά από το ύψος των ταμιευτήρων του Ελευθέριου και καταλήγει στη σήραγγα της Κάρλας με μήκος 38 Km, πλάτος 15-17 m και μέσο βάθος 3 m. Στο αρχικό τμήμα της τάφρου συμβάλλουν οι τάφροι 8Τ και 9Τ. Η τάφρος αυτή κατασκευάσθηκε μεταγενέστερα από την τάφρο 2Τ και οι διαστάσεις της κοίτης αποδείχθηκαν επαρκείς για την εκπλήρωση των σκοπών της. Υπέστη διευθέτηση σε πολλά τμήματά της για τις

ανάγκες της ανασύστασης της λίμνης. Χρησιμοποιείται και για την τροφοδοσία των αρδευτικών ταμιευτήρων.



Σχήμα 5. 14. Τελικό τμήμα της τάφρου 1T με τη σήραγγα να φαίνεται στο βάθος.

- Τάφρος 2T

Η τάφρος 2T συλλέγει τα νερά των δυτικών κεντρικών και νότιων εκτάσεων της πεδιάδας, συνολικής έκτασης 178 Km² και τα οδηγούσε πριν την ανασύσταση της λίμνης στη σήραγγα Κάρλας. Σε αυτήν καταλήγουν οι τάφροι 3T, 4T, 5T και 7T που συλλέγουν τα νερά των δυτικότερων τμημάτων της λεκάνης. Αποτελεί συνέχεια της 7T και ξεκινά ανάμεσα από τους οικισμούς Γλαύκη και Πρόδρομος και πριν την κατάληξη της στον ταμιευτήρα συνενώνεται με το νέο συλλεκτήρα Σ4. Αργότερα οι διατομές των τάφρων διευρύνθηκαν, με αποτέλεσμα να έχουν σήμερα επαρκή αποχετευτική ικανότητα. Έχει μήκος 28 Km, το πλάτος της ποικίλει από 10 m μέχρι και 20 m και το μέσο βάθος της ξεπερνά τα 2 m. Σήμερα καταλήγει στον ταμιευτήρα της Κάρλας και αποτελεί την τάφρο μεταφοράς των πλημμυρικών απορροών του Πηνειού στην Κάρλα (Σχήμα 5.15).



Σχήμα 5. 15. Σύγχρονη κατάληξη της τάφρου 2T στον ταμιευτήρα της Κάρλας

- Σήραγγα Κάρλας

Η σήραγγα της Κάρλας αποτελεί τη μόνη διέξοδο για τα νερά της πεδιάδας Λάρισας – Κάρλας, τα οποία οδηγούνται μέσω ανοιχτής τάφρου από τη ΒΙ.ΠΕ. Βόλου στον Παγασητικό Κόλπο στην περιοχή Μπουρμπουλήθρα της Νεάπολης. Τα κύρια χαρακτηριστικά της είναι:

- ο Μήκος : 10120 m.
- ο Επιφάνεια πεταλοειδούς διατομής : 4.35 m².
- ο Υψόμετρο εισόδου : 48.25 m.
- ο Κλίση : 0.15%
- ο Παροχευτική ικανότητα : 8.5 m/sec.

Η παροχευτική ικανότητα της σήραγγας είναι τελείως ανεπαρκής για την απομάκρυνση όλων των υδάτων της λεκάνης απορροής της περιοχής Κάρλας που δεν μπορούν να κατευθυνθούν προς τον Πηνειό ποταμό και συγκεντρώνονται στις δύο κύριες τάφρους 1Τ και 2Τ. Ο μηχανισμός του θυροφράγματος της σήραγγας δεν λειτουργεί πλέον, αφήνοντάς την μονίμως ανοιχτή και έχει τοποθετηθεί νέο θυρόφραγμα στην κατάληξη της 1Τ, λίγα μέτρα ανάντη της σήραγγας.



Σχήμα 5. 16. Είσοδος - Έξοδος της σήραγγας της Κάρλας

- Συλλεκτήρας Σ1

Ο συλλεκτήρας Σ1 συλλέγει τα νερά των περισσότερων ρεμάτων της νοτιοδυτικής λεκάνης και τα κατευθύνει στον Πηνειό, στις βόρειες παρυφές της

Λάρισας. Ξεκινά από το ύψος του οικισμού Μεγάλο Μοναστήρι και το συνολικό μήκος του είναι 37 Km. Εξαιτίας του μειώθηκε η έκταση της λεκάνης απορροής της Κάρλας από 1660 Km² σε 1170 Km². Στο συλλεκτήρα Σ1 συμβάλλουν ο συλλεκτήρας Is της BOOT και ο χειμάρρος Νέας Λεύκης, ο οποίος λίγο πριν τη συμβολή του στον Σ1 δέχεται τα νερά του χειμάρρου Νέας Καρυάς. Ο συλλεκτήρας αυτός διευρύνθηκε από τη Χ.Θ. 0+200 έως τη Χ.Θ. 11+925 με ενιαία κατά μήκος κλίση πυθμένα J=0,6% και πλάτος πυθμένα κυμαινόμενο από b=30 m έως b=35 m. Αλλά και η διευρυμένη διατομή του συλλεκτήρα δε φαίνεται να εξασφαλίζει την πλήρη προστασία της περιοχής, κυρίως στο τελευταίο τμήμα του αμέσως ανάντη της συμβολής του με τον ποταμό Πηνειό.

Οι υπόλοιπες μικρές τάφροι 6T, 5T, 4T, 3T βρίσκονται ανάμεσα στον συλλεκτήρα Σ1 και την 2T και παροχετεύουν τα νερά τους στην 2T. Η 7T αποτελεί το ανάντη τμήμα της 2T. Ξεκινά από το ύψος του ρέματος Ασμακίου και συνεχίζει ως 2T. Στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζονται τα έργα αποξήρανσης της λίμνης και οι περίοδοι που αυτά κατασκευάστηκαν.

Πίνακας 5. 7. Τα έργα που συνέβαλαν στην αποξήρανση της λίμνης Κάρλα

Έτος	Έργα
1900-1920	Τοπογράφιση της περιοχής.
1927	Χαρτογράφιση της περιοχής
1936-1941	Μικρά έργα
1949-1950	Αναχώματα εγκιβωτισμού Πηνειού, συλλεκτήρες ορεινών υδάτων Σ1-Σ5
1951	Διάνοιξη της τάφρου 1T
1952	Τοπογραφικό διάγραμμα και κτηματολογικός χάρτης της περιοχής
1961	Βάση της μελέτης Νικολαΐδη γίνεται η διάνοιξη της σήραγγας Κάρλας από δύο μέτωπα από Έλληνες τεχνικούς
1962	Ολική αποξήρανση της λίμνης και η κατασκευή των τάφρων 2T, 3T, 4T, 5T, 6T

5.6.4. Ανασύσταση της λίμνης Κάρλα

Οι αρνητικές συνέπειες που προκάλεσε η αποξήρανση της λίμνης οδήγησαν στην αναγκαία αναστροφή αυτού του προβλήματος με το μεгалόπνοο σχέδιο ανασύστασής της. Ο σχεδιασμός της ανασύστασης είχε ξεκινήσει σε επίπεδο μελετών από το 1978. Έπειτα, πολλές μελέτες εκπονήθηκαν μέχρι την οριστική κατάληξη του τελικού σχεδίου, το οποίο εντάχθηκε, ως περιβαλλοντικό έργο, στο Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Περιβάλλον – Αειφόρος Ανάπτυξη», Γ ΚΠΣ 2000-2006 το 1998 (Άξονας 9: Προστασία Φυσικού Περιβάλλοντος και Βιοποικιλότητας), από τη Διεύθυνση Εγγειοβελτιωτικών Έργων (Δ7) του τότε ΥΠΕΧΩΔΕ σε συνεργασία με τις Νομαρχίες Λάρισας και Μαγνησίας και ξεκίνησε να υλοποιείται από το 2000. Η σύμβαση που έχει ανατεθεί από το 2000 για το σκοπό αυτό έχει ολοκληρωθεί στο πλαίσιο του Γ ΚΠΣ (2000-2006). Την 7/1/2009 υπεγράφη νέα σύμβαση υπηρεσιών. Το 25% περίπου του αντικειμένου της σύμβασης αυτής ολοκληρώθηκε στο Γ ΚΠΣ. Το υπόλοιπο 75% εντάχθηκε στο ΕΣΠΑ 2007-2013 στο ίδιο Επιχειρησιακό Πρόγραμμα. Τα αρδευτικά έργα, λόγω της φύσης τους, δεν ήταν δυνατό να ενταχθούν στο συγκεκριμένο

Επιχειρησιακό Πρόγραμμα και εντάχθηκαν στο Πρόγραμμα «Αλέξανδρος Μπαλτατζής» του ΕΣΣΑΑ 2007-2013.

Με βάση το σχήμα που προτάθηκε και μελετήθηκε, σκοπός των έργων επαναδημιουργίας της λίμνης Κάρλας είναι η αποκατάσταση της οικολογικής ισορροπίας της περιοχής της λίμνης Κάρλας. Δευτερεύοντες στόχους του έργου αποτελούν, η αντιπλημμυρική προστασία της ευρύτερης περιοχής και η αποκατάσταση των, υποβαθμισμένων σήμερα, συνθηκών του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα των παρά την Κάρλα περιοχών με ταυτόχρονη εξασφάλιση επαρκών ποσοτήτων νερού από γεωτρήσεις για την ύδρευση του Βόλου. Ειδικότερα το έργο στοχεύει:

- Στη δημιουργία μιας μεγάλης υγροτοπικής έκτασης (λίμνης περιβαλλόμενης από ζώνες ειδικής διαχείρισης), κατάλληλης να υποστηρίξει τον φυσικό (μόνιμο ή εποχικό) εποικισμό της περιοχής με υγροφυτική βλάστηση, ιχθυοπανίδα και παρυδάτια ορνιθοπανίδα, ώστε να αποκατασταθεί μερικώς τουλάχιστον το προϋπάρχον της αποξήρανσης οικοσύστημα (υγροβιότοπος) και να ελαχιστοποιηθεί η συμβολή των απορροών της λεκάνης Κάρλας στη ρύπανση του Παγασητικού κόλπου.
- Στη δημιουργία προϋποθέσεων και κανόνων για την ορθή διαχείριση του αναμενόμενου οικοσυστήματος που θα δημιουργηθεί και των διαθέσιμων υδατικών πόρων.
- Στην αντικατάσταση του υπόγειου νερού των αρδεύσεων με νερό της λίμνης, προκειμένου να δημιουργηθούν προϋποθέσεις ανάκαμψης της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, να βελτιωθεί η ποιότητα των εδαφικών πόρων και να ανασταλούν τα φαινόμενα απερίμωσης των πεδινών περιοχών.
- Στην ανάσχεση των πλημμυρικών απορροών στις πέριξ της λίμνης ορεινές περιοχές για την επιβράδυνση των διαβρωτικών διεργασιών.
- Στην ενίσχυση της ύδρευσης της μείζονος περιοχής Βόλου με καλής ποιότητας υπόγειο νερό.
- Στην εμφάνιση ήπιου οικοτουρισμού
- Στη δημιουργία υποδομών και ευνοϊκών συνθηκών για την πραγματοποίηση νέων, συμβατών με τη βιώσιμη ανάπτυξη, δραστηριοτήτων και απασχόλησης.

Το έργο επαναδημιουργίας της λίμνης Κάρλας αφορά τη δημιουργία μιας μεγάλης υγροτοπικής έκτασης (λίμνης περιβαλλόμενης από ζώνες ειδικής διαχείρισης) και περιλαμβάνει συνοπτικά :

- Τη δημιουργία τεχνητής λίμνης, μέσου βάθους 4,5 μ., έκτασης 38000 στρ., στο χαμηλότερο τμήμα της άλλοτε λίμνης Κάρλας, τροφοδοτούμενης από τις απορροές των πέριξ λεκανών και από τα χειμερινά νερά του Πηνειού.
- Κατασκευή συλλεκτήρων με τους οποίους επιτυγχάνεται η τροφοδοσία της λίμνης με νερά των πέριξ ορεινών λεκανών και η αντιπλημμυρική προστασία των πεδινών περιοχών.
- Αντλιοστάσια για την άντληση των όμβριων νερών των χαμηλών περιοχών γύρω από τη λίμνη με στόχο την περαιτέρω τροφοδοσία της λίμνης και την αντιπλημμυρική προστασία των περιοχών αυτών.

- Έργα υδροδότησης της λίμνης από τα χειμερινά νερά του Πηνειού, με αντλιοστάσιο για την ανύψωση του νερού πάνω από τα αναχώματα αντιπλημμυρικής προστασίας του ποταμού.
- Έργα βελτιστοποίησης των λειτουργιών της λίμνης ως υγροβιότοπου (3 νησίδες, αβαθή υγρότοπο καθαρισμού νερών αποστράγγισης, έκτασης περίπου 1100 στρ. και αναπαράστασης του παραδοσιακού τρόπου διαβίωσης και αλιείας, παρόχθια φυτικά οικοσυστήματα), όπως καθορίζονται στους εγκεκριμένους Περιβαλλοντικούς Όρους του έργου.
- Έργα υποδομών οικοτουριστικής ανάπτυξης με σκοπό την προσέλκυση επισκεπτών για περιβαλλοντική εκπαίδευση και ήπιες τουριστικές δραστηριότητες καθώς και την προβολή ενός πρότυπου έργου πολλαπλού χαρακτήρα με ισχυρή περιβαλλοντική διάσταση, όπως καθορίζονται στους εγκεκριμένους Περιβαλλοντικούς Όρους του έργου.
- Έργα ορεινής υδρονομίας για την ανάσχεση των επιφανειακών διαβρώσεων των ορεινών πέριξ της λίμνης λεκανών με στόχο τον περιορισμό της μεταφοράς φερτών υλικών που καταλήγουν στο σύστημα συλλεκτήρες-λίμνη, όπως καθορίζονται στους εγκεκριμένους Περιβαλλοντικούς Όρους του έργου.
- Δημιουργία φυτικών οικοσυστημάτων στην εξωτερική πλευρά του δυτικού αναχώματος και στο περιμετρικό όριο των ανατολικών και νότιων ακτών της λίμνης σε σημεία που προσφέρονται για την ανάπτυξη της βλάστησης με στόχο την ολοκλήρωση της διαμόρφωσης του υγροτόπου.
- Έργα μεταφοράς νερού από τη λίμνη στις γειτνιάζουσες πεδινές περιοχές με σκοπό αφ' ενός την αξιοποίησή του για άρδευση υποκαθιστώντας τις αντλήσεις από τον υπόγειο υδροφόρα, αφ' ετέρου την ανανέωση των υδάτων της λίμνης.
- Άρδευτικά δίκτυα στις γύρω από τη λίμνη περιοχές συνολικής έκτασης περίπου 92500 στρ., που σήμερα αρδεύονται ως επί το πλείστον με υπόγεια νερά.
- Έργα ενίσχυσης της ύδρευσης της μείζονος περιοχής Βόλου από τα εξοικονομούμενα νερά του υπόγειου υδροφόρα.

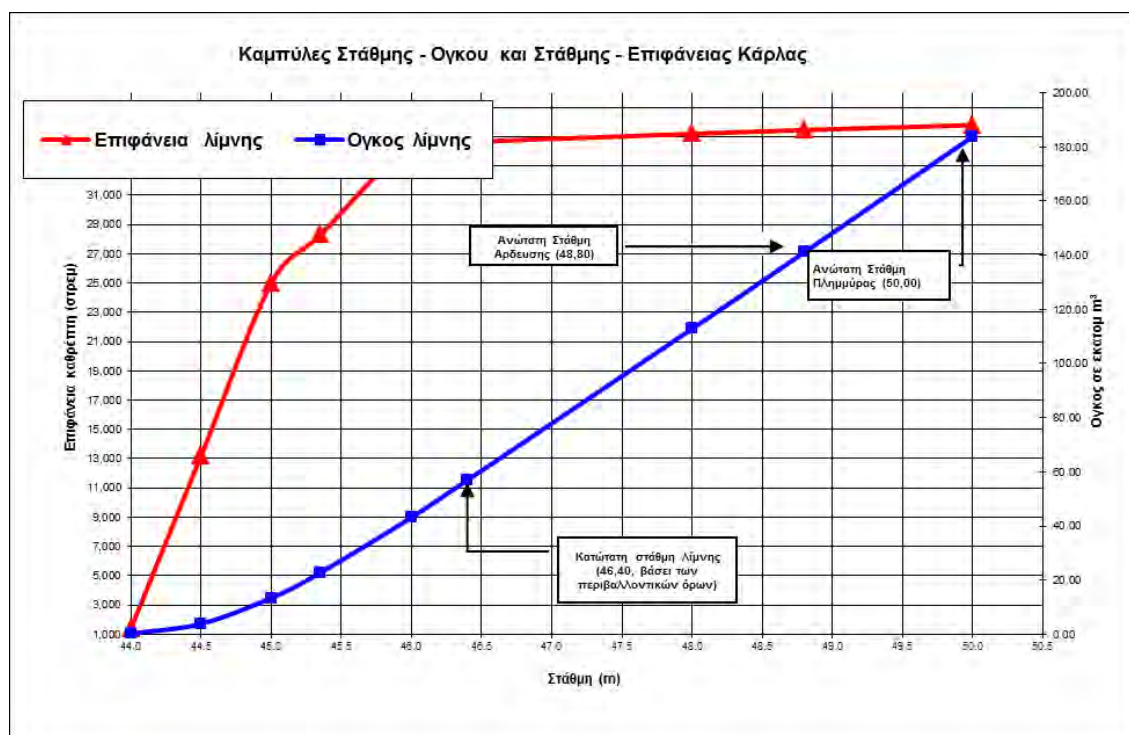
Οι εργολαβίες των έργων, με τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά τους, που αφορούν την ανασύσταση της λίμνης είναι οι κάτωθι:

- Εργολαβία κατασκευής του ταμιευτήρα της Κάρλας και συναφών έργων:
Ταμιευτήρας χωρητικότητας $184 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ στο χαμηλότερο τμήμα της παλιάς λίμνης Κάρλας, έκτασης περίπου 38000 στρεμμάτων με την κατασκευή αναχωμάτων (ανατολικού, μήκους 2700 m και του δυτικού, μήκους 13000 m). Προστατευτικά αναχώματα προβλέπονται και στο βόρειο τμήμα της λίμνης για τον έλεγχο των διαφυγών στα καρστικά μάρμαρα (συνολικού μήκους περίπου 6900 m). Η στέψη των αναχωμάτων προσδιορίστηκε στα +52.50 m και το μέσο ύψος τους είναι 9 m. Οι στάθμες λειτουργίας του ταμιευτήρα έχουν καθορισθεί ως εξής :
- Κατώτατη στάθμη άρδευσης (ΚΣΑ) : +46.40 m
- Ανώτατη στάθμη άρδευσης (ΑΣΑ) : +48.80 m

- Ανώτατη στάθμη πλημμύρας (ΑΣΠ) :+50.00 m

Πίνακας 5. 8. Στάθμες λειτουργίας του ταμιευτήρα με τις αντίστοιχες τιμές επιφάνειας και όγκου νερού

Στάθμη	Υψόμετρο (m)	Επιφάνεια (στρ.)	Όγκος (hm ³)
Κατώτατη	46.4	34.65	57.01
Ανώτατη άρδευση	48.8	35.45	141.14
Ανώτατη πλημμυρών	50	35.8	183.88



Σχήμα 5. 17. Νομογράφημα της επιφάνειας και του όγκου της λίμνης σε σχέση με τη στάθμη της

Υγρότοπος ποιοτικής αναβάθμισης των στραγγιστικών υδάτων της τάφρου 1Τ, επιφανείας 1100 στρεμμάτων περίπου και μέσου βάθους 15 cm εξωτερικά του δυτικού αναχώματος του ταμιευτήρα. Ο υγρότοπος αυτός θα αποτελέσει συμπληρωματικό οικοσύστημα της περιοχής της λίμνης. Κατασκευή δύο αντιπλημμυρικών αντλιοστασίων, τα οποία θα παροχετεύουν τα επιφανειακά ύδατα στη λίμνη. Το πρώτο και μεγαλύτερο αντλιοστάσιο τοποθετείται δυτικά του ταμιευτήρα, στον κόμβο της Πέτρας συνολικής παροχής 24 m³/sec παροχετεύοντας στον ταμιευτήρα τα ύδατα της τάφρου 1Τ. Το δεύτερο και μικρότερο τοποθετείται στο μέσο του ανατολικού αναχώματος της Κάρλας, στον κάμπο των Καναλιών, με συνολική παροχή 3.6 m³/sec και παροχετεύει τα τις απορροές της υπολεκάνης των Καναλιών. Έργα ασφαλείας υπερχειλίσης της λίμνης στον κόμβο Πέτρας παροχής Q=500 m³/sec. για την περίπτωση που υπερβεί η στάθμη της λίμνης το +50 m. Τα νερά που θα υπερχειλίσουν θα κατακλύζουν την χαμηλή περιοχή και θα απάγονται μέσω της υφιστάμενης

αποστραγγιστικής σήραγγας Κάρλας προς τον Παγασητικό με τον ρυθμό που επιτρέπει η διοχετευτικότητά της ($8,5 \text{ m}^3/\text{sec}$).

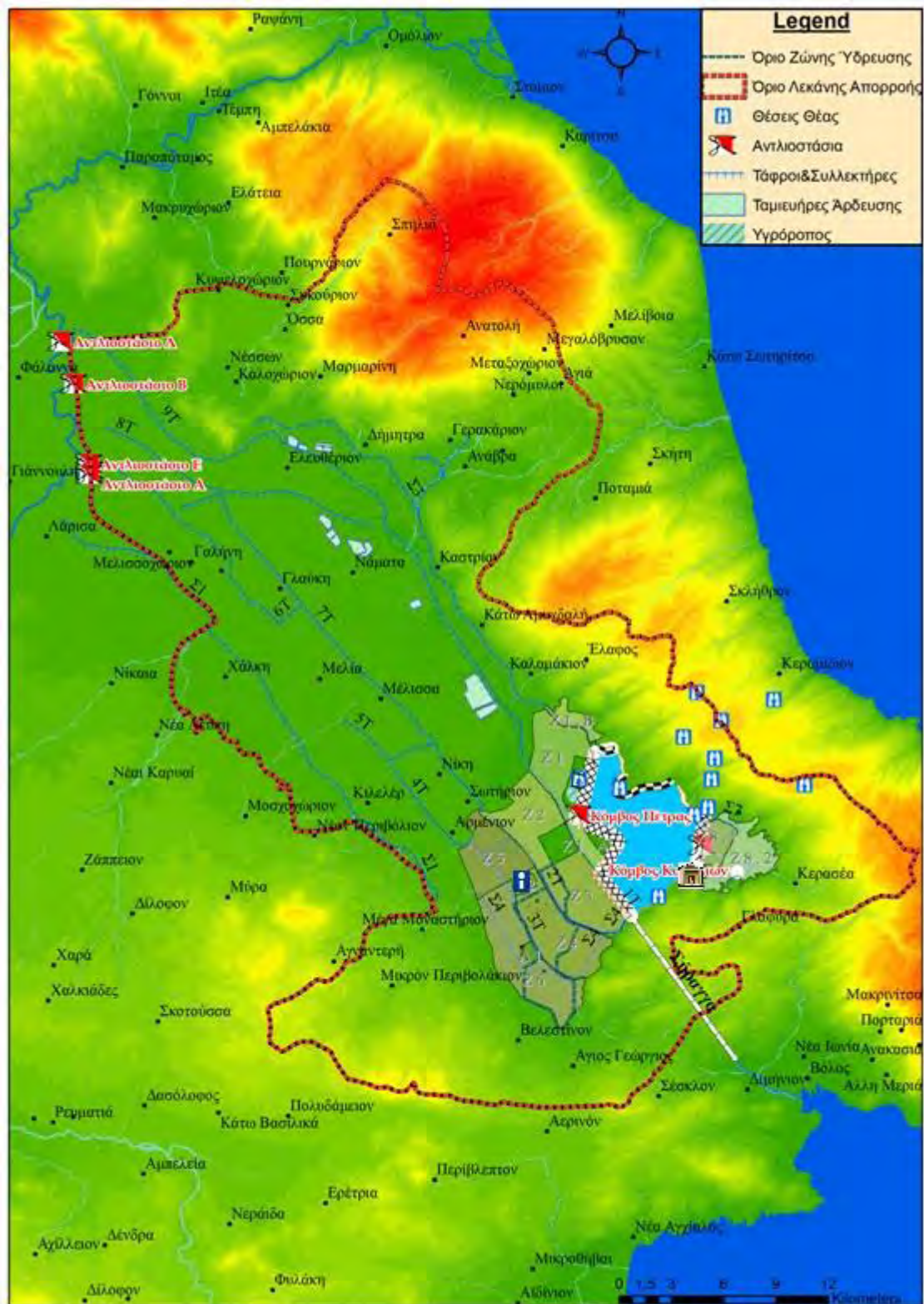
- Εργολαβία υδροδότησης της λίμνης Κάρλας από τον Πηνειό: Αλλαγή χάραξης της 2Τ, ώστε να καταλήγει στον ταμιευτήρα και όχι στην σήραγγα της Κάρλας και διευθέτηση όλου του συστήματος μεταφοράς του νερού (2Δ,6Τ,2Τ). Κατασκευή αντλιοστασίου στον Πηνειό, στη θέση Καραούλι, πλησίον του εργοστάσιου Ζάχαρης, συνολικής παροχής $14 \text{ m}^3/\text{sec}$, το οποίο θα αντλεί τα πλημμυρικά νερά του Πηνειού και θα τα διοχετεύει στη διώρυγα 2Δ. Επίσης η κατασκευή φράγματος στη Γυρτώνη και αντλιοστασίων για δεύτερη απόληψη υδάτων του Πηνειού και μεταφοράς τους μέσω της τάφρου 9Τ.
- Εργολαβία ορεινής υδρονομίας περιοχής Κάρλας: Περιφερειακοί συλλεκτές Σ3, Σ4, Σ6 και Σ7 για την εκτροπή των επιφανειακών απορροών όμβριων προς τον ταμιευτήρα.
 - Ο Σ3 είναι ο μεγαλύτερος σε μέγεθος συλλεκτήρας μιας και συλλέγει τα νερά των λεκανών απορροής των πεδινών, ημιορεινών και ορεινών περιοχών όλου του ανατολικού μετώπου της λεκάνης από το Όρος Όσσα μέχρι το Καλαμάκι, συνολικής έκτασης $314,4 \text{ Km}^2$. Επίσης, θα δέχεται και τις απορροές της λεκάνης Καλοχωρίου, μετά την διάνοιξη της σχετικής σήραγγας. Έχει μήκος $32,5 \text{ Km}$, πλάτος που φτάνει μέχρι τα 60 m και βάθος τα 6 m , με παροχή σχεδιασμού τα $31 \text{ m}^3/\text{sec}$. Η είσοδος του στον ταμιευτήρα βρίσκεται στην βόρεια πλευρά.
 - Ο Σ4 συλλέγει τα νερά των λεκανών απορροής των ορεινών και ημιορεινών περιοχών, που εκτείνονται προς τη νότια-νοτιοδυτική πλευρά της πεδιάδας Κάρλας (Χαλκοδόνιο Όρος), συνολικής έκτασης 202 Km^2 και στον οποίο συμβάλει επιπλέον η τάφρος 2Τ. Τοποθετείται δυτικότερα της 3Τ και έχει μήκος $13,7 \text{ Km}$. Στο ανάντη άκρο έχει παροχή σχεδιασμού $83 \text{ m}^3/\text{sec}$, ενώ στην εκβολή του $213 \text{ m}^3/\text{sec}$.
 - Ο Σ6 συλλέγει τα νερά των λεκανών απορροής των υψωμάτων που εκτείνονται προς τα νοτιοδυτικά της Κοινότητας Κερασιάς, έκτασης $53,6 \text{ Km}^2$ καθώς και ένα μέρος των επιφανειακών απορροών του ρέματος Ξεριάς και εκβάλλει στον ταμιευτήρα αφού παρακάμψει το νότιο άκρο του ανατολικού αναχώματος αυτού. Έχει μήκος $4,6 \text{ Km}$. Στο ανάντη άκρο του η παροχή είναι $69 \text{ m}^3/\text{sec}$ και στην εκβολή του $96 \text{ m}^3/\text{sec}$.
 - Ο Σ7 συλλέγει τα νερά των λεκανών απορροής των υψωμάτων που εκτείνονται περίξ της Κοινότητας Καναλίων έκτασης 14 Km^2 και εκβάλλει στον ταμιευτήρα, αφού παρακάμψει το βόρειο άκρο του ανατολικού αναχώματος αυτού. Έχει μήκος $2,6 \text{ Km}$. Στο ανάντη άκρο του η παροχή είναι $18 \text{ m}^3/\text{sec}$ και στην εκβολή του $32 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Την εργολαβία ολοκληρώνουν διευθετήσεις και κατασκευή αναβαθμών στα ρέματα των γύρω ορεινών όγκων, για να προστατέψουν τους συλλεκτήρες από

μεγάλες ποσότητες φερτών υλών. Εδώ εντάσσονται και τα έργα διευθέτησης του Άμυρου ποταμού στην Αγιά, ώστε να οδηγηθούν στον συλλεκτήρα Σ3.

- Εργολαβία μεταφοράς νερού και άρδευσης: Κατασκευή 2 αντλιοστασίων άρδευσης Α0 στον κόμβο Πέτρας και Α2 στον κόμβο Καναλίων, πλησίον των αντίστοιχων αντλιοστασίων αποχέτευσης και υπολοίπων τεσσάρων εντός του δικτύου άρδευσης, το οποίο θα αποτελείται από κλειστό υπόγειο σύστημα αγωγών. Μόνη εξαίρεση αποτελεί η άρδευση από τα επιφανειακά ύδατα της ΙΤ, όπως πραγματοποιείται και σήμερα. Η εξυπηρετούμενη συνολική έκταση των καλλιεργειών από το δίκτυο φτάνει τα 92500 στρ. και το μέγιστο επιτρεπτό που μπορεί να αντληθεί ετησίως από τον ταμιευτήρα για την ικανοποίηση των αρδευτικών αναγκών είναι $46 \text{ m}^3/\text{sec}$.
- Εργολαβία ύδρευσης Βόλου: Προβλέπονται τα εξής έργα, τα οποία θα υδροδοτούν την πόλη του Βόλου με 10.6 hm^3 ετησίως:
 - Διάνοιξη και εξοπλισμό υδρογεωτρήσεων (50 εν συνόλω με παροχή άντλησης $50 \text{ m}^3/\text{h}$) νοτίως του οικισμού Στεφανοβικείου μέχρι το στρατόπεδο Π.Ε.Β. Το δίκτυο αυτό τοποθετείται στη Ζώνη 1, στην οποία προβλέπεται να κλείσουν όλες οι ιδιωτικές αρδευτικές γεωτρήσεις.
 - Έργα συλλογής των νερών των γεωτρήσεων προς τις 2 δεξαμενές, μήκους 32 Km από αγωγούς πολυαιθυλενίου (3ης γενιάς)
 - Δύο αντλιοστάσια – δεξαμενές
 - Ένας αγωγός μεταφοράς από τα δύο αντλιοστάσια προς την Δεξαμενή Αρμάτων (ΔΕΥΑΜΒ).
- Εργολαβία ανάδειξης περιβάλλοντος: Αφορά την τουριστική ανάδειξη της περιοχής και περιλαμβάνει φυτεύσεις πέριξ του ταμιευτήρα, θέσεις θέας τόσο πέριξ της λίμνης, όσο και στο Μαυροβούνι, περιπατητικά μονοπάτια, εγκαταστάσεις παρακολούθησης υδρόβιων πουλιών, κέντρο πληροφόρησης στο Στεφανοβίκειο και μουσείο φυσικής ιστορίας και λιμναίου πολιτισμού στα Κανάλια.

Από τα προαναφερθέντα έργα αυτά τα οποία έχουν ολοκληρωθεί είναι το έργο του ταμιευτήρα, η πρώτη φάση του έργου μεταφοράς νερού από τον Πηνειό και το έργο ανάδειξης. Τα υπόλοιπα έργα βρίσκονται στη φάση κατασκευής ακόμη, ξεπερνώντας το προβλεπόμενο χρονοδιάγραμμα, εξαιτίας διαφόρων προβλημάτων που προέκυψαν, με τα σημαντικότερα να είναι: αρχαιολογικά ευρήματα στο συλλεκτήρα Σ6, μη ικανοποίηση των ιδιοκτητών από τις αποζημιώσεις για τις απαλλοτριώσεις και προσφυγή μέσω της δικαστικής οδού, έλλειψη οικονομικών πόρων, όπως στο έργο άρδευσης και αντιδράσεις της τοπικής κοινωνίας για την εγκατάσταση των νέων υδρευτικών γεωτρήσεων. Η καθυστέρηση όμως αυτή έχει μεγάλη αρνητική επίπτωση στην ανασύστασης της λίμνης Κάρλα διαταράσσοντας την ορθή οικολογική και περιβαλλοντική της αποκατάσταση. Στο χάρτη του Σχήματος 5.18 παρουσιάζονται τα έργα ανασύστασης της λίμνης Κάρλα.



Σχήμα 5. 18. Έργα ανασύστασης της λίμνης Κάρλας

Το κόστος όλου αυτού του μεγαλόπνοου περιβαλλοντικού έργου ανέρχεται στα 250 εκ. ευρώ περίπου. Στον Πίνακα 5.9 αναλύεται το κόστος του.

Πίνακας 5. 9. Κατηγορίες κόστους του έργου ανασύστασης

ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ		
	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΔΑΠΑΝΩΝ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΕΡΓΟΥ, €
A	ΔΑΠΑΝΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	6.668.884
B	ΑΓΟΡΑ ΓΗΣ – ΑΠΑΛΛΟΤΡΙΩΣΕΙΣ	48.570.506
Γ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ	
1	Κατασκευή ταμιευτήρα, συλλεκτήρων & νησίδων	75.130.171
2	Δημιουργία Υγρότοπου και Υπολειπόμενα έργα	15.200.000
3	Έργα υδροδότησης Κάρλας από Πηνεϊό	5.125.467
4	Έργα ορεινής υδρονομίας περιοχής Κάρλας	7.800.000
5	Έργα ύδρευσης Βόλου από την Κάρλα	7.300.000
6	Έργα ανάδειξης	
	α) Έργα ανάδειξης περιβάλλοντος και οικότουρισμού Κάρλας	1.600.000
	β) Μουσείο και κέντρο πληροφόρησης	3.200.000
	γ) Μέσα ερμηνείας	500.000
7	Έργα μεταφοράς νερού και άρδευσης	25.423.729
Δ	ΛΟΙΠΕΣ ΔΑΠΑΝΕΣ	
1	Αρχαιολογικές έρευνες	14.428.427
2	Start up Φορέα Διαχείρισης	252.101
3	Τεχνική βοήθεια	4.011.683
4	Δημοσιότητα, ενημέρωση και ευαισθητοποίηση	273.950
	ΥΠΟΣΥΝΟΛΟ ΧΩΡΙΣ ΦΠΑ	215.484.918
	Φόροι (ΦΠΑ)	30.811.207
	ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ	246.296.127

5.6.5. Περιγραφή λειτουργίας του έργου

Σύμφωνα με τα προβλεπόμενα στους Περιβαλλοντικούς Όρους του έργου η ανώτατη στάθμη λειτουργίας της λίμνης ορίζεται στο +48,80 m, που αντιστοιχεί σε όγκο νερού 141.14 hm³ περίπου. Η κατώτατη στάθμη λειτουργίας της λίμνης, σύμφωνα και με τους περιβαλλοντικούς όρους, ορίζεται στο +46,40 m, που αντιστοιχεί σε όγκο νερού 57.01 hm³ περίπου. Με τις στάθμες αυτές λειτουργίας είναι δυνατή η απόληψη ποσότητας νερού 46 hm³ ετησίως από τη λίμνη. Η ανώτατη στάθμη πλημμύρας καθορίζεται στο +50,00 m μέσω του προβλεπόμενου έργου ασφαλείας στον κόμβο Πέτρας. Το έργο αυτό θα λειτουργεί σε περιπτώσεις εξαιρετικά έντονων βροχοπτώσεων, οπότε τα υπερχειλίζοντα νερά θα κατακλύζουν τη χαμηλή περιοχή και θα απάγονται μέσω της υφιστάμενης σήραγγας προς τον Παγασητικό κόλπο με το ρυθμό που επιτρέπει η διοχετευτικότητα της.

Η λίμνη θα τροφοδοτείται με:

- τα όμβρια νερά της λεκάνης απορροής της λίμνης. Τα νερά των υψηλότερων περιοχών της λεκάνης θα συλλέγονται με φυσική ροή μέσω των συλλεκτήρων Σ3, Σ4, Σ6 και Σ7 και τα νερά των χαμηλών περιοχών της λεκάνης θα αντλούνται στη λίμνη με τα αντλιοστάσια αποχέτευσης DP1 στον κόμβο Πέτρας

και DP2 στον κόμβο Καναλίων. Μόνο ένα ποσοστό των υδάτων αυτών που οδηγούνται από την 1T στο αντλιοστάσιο DP1, θα υπόκεινται σε πρωτοβάθμια επεξεργασία, μέσω του υγροτόπου ποιοτικής αναβάθμισης. Συνολική ετήσια απορροή : 20-35 hm³

- την απ' ευθείας βροχόπτωση μέσα στη λίμνη. Ετήσια απορροή : 15-19 hm³
- τα χειμερινά νερά του Πηνειού, που θα αντλούνται από τον ποταμό και θα μεταφέρονται με φυσική ροή στη λίμνη, μέσω της υφιστάμενης διώρυγας 2Δ, των υφιστάμενων τάφρων 6T και 2T και του προβλεπόμενου συλλεκτήρα Σ4. Προβλέπεται ετήσια απόληψη νερών από τον Πηνειό μέχρι 80 hm³.

Οι απώλειες - απολήψεις νερού από τη λίμνη θα είναι :

- οι υπόγειες διαφυγές που εκτιμώνται από τις μελέτες σε 20 hm³
- η εξάτμιση του νερού της λίμνης που υπολογίζεται σε 38 hm³
- η απόληψη νερού για άρδευση και κάλυψη των αναγκών των έργων περιβαλλοντικής ανάδειξης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με τις καθορισμένες στάθμες λειτουργίας της λίμνης είναι δυνατή η απόληψη ποσότητας νερού 46 hm³ ετησίως, για την άρδευση 92500 στρ. Το νέο αρδευτικό δίκτυο με τι ζώνες του φαίνεται στο χάρτη του Σχήματος 5.18.

5.6.6. Προστατευόμενες περιοχές της λεκάνης της Κάρλας.

Περιοχές της λεκάνης απορροής και πέριξ αυτής, έχουν ενταχθεί στο δίκτυο NATURA 2000, λόγω της σημαντικής τους βιοποικιλότητας. Οι περιοχές αυτές είναι:

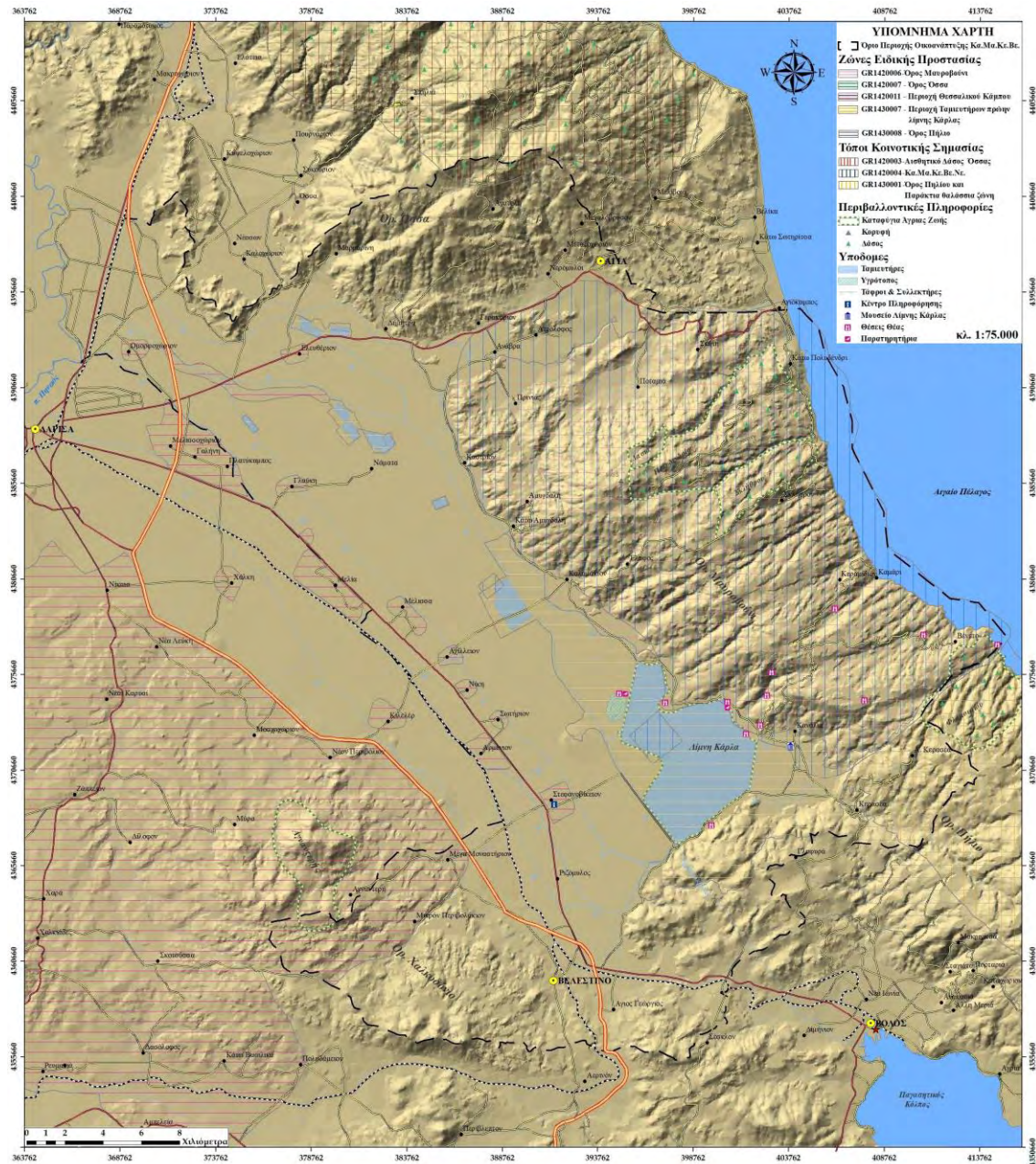
- Ζώνες Ειδικής Προστασίας:
 - ο GR1420006 – Όρος Μαυροβούνι έκτασης 363315 στρ.
 - ο GR1420007 - Όρος Όσσα έκτασης 241260 στρ.
 - ο GR1420011 – Περιοχή Θεσσαλικού κάμπου έκτασης 955961 στρ.
 - ο GR143007 – Περιοχή Ταμιευτήρων πρώην λίμνης Κάρλας έκτασης 124416 στρ.
 - ο GR143008 – Όρος Πήλιο έκτασης 361930 στρ.
- Τόποι Κοιντικής Σημασίας:
 - ο GR1420003 – Αισθητικό Δάσος Όσσας εκτάσεως 195800 στρ.
 - ο GR1420004 – Κα.Μα.Κε.Βε.Νε. εκτάσεως 434350 στρ.
 - ο GR1430001 – Όρος Πηλίου και παράκτια θαλάσσια ζώνη εκτάσεως 311120 στρ.

Επίσης, συναντώνται και τέσσερα καταφύγια Άγριας Ζωής:

- Αγναντερής, στο Χαλκοδόνιο Όρος, εκτάσεως 24500 στρ.
- Δασόκτημα Πολυδενδρίου, στο Μαυροβούνι, εκτάσεως 34530 στρ.

- Δασιάς – Πλατανιάς στο Μαυροβούνι, εκτάσεως 7740 στρ.
- Λίμνη Κάρλα, εκτάσεως 38000 στρ.

Η βιοποικιλότητα της περιοχής καθιστά ακόμη μεγαλύτερη την ανάγκη για τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων της λεκάνης, μιας και εξαρτάται άμεσα από αυτή. Στο χάρτη του Σχήματος 5.19 παρουσιάζονται οι περιοχές του δικτύου NATURA 2000 και τα Καταφύγια Άγριας Ζωής.



Σχήμα 5. 19. Περιοχές του δικτύου NATURA 2000 και Καταφύγια Άγριας Ζωής της λεκάνης της Κάρλας

6. ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Τηρώντας τις επιταγές της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000, για την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής, η εν λόγω έρευνα εφάρμοσε ένα σύστημα τεσσάρων μοντέλων προσομοίωσης των υδατικών πόρων της λεκάνης, ενός μοντέλου γεωστατιστικής και ενός διαχειριστικού μοντέλου. Όλα τα μοντέλα είναι συζευγμένα μέσω της ανταλλαγής δεδομένων/αποτελεσμάτων, τα οποία θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Πυρήνας του συστήματος αυτού είναι το μοντέλο υπόγειας ροής, το οποίο προσομοιώνει τον υδατικό πόρο που μελετάται στην εν λόγω έρευνα.

Σκοπός αυτού του συστήματος μοντέλων είναι να εκτιμήσει τις δυναμικές μεταβολές των φυσικών διεργασιών των υδατικών πόρων της λεκάνης μέσα στην περίοδο μελέτης. Τελικός αποδέκτης όλων αυτών των μεταβολών είναι ο υπόγειος υδροφορέας της λεκάνης. Η μεθοδολογία της αξίας της πληροφορίας που εξετάζεται για τον υπόγειο υδροφορέα, μελετάται σε πραγματικές συνθήκες απόκρισης του συστήματος και αυτό αποτελεί ένα καινοτόμο στοιχείο για την εν λόγω έρευνα.

Το σύστημα των μοντέλων απαρτίζεται από:

- ένα μοντέλο προσομοίωσης της επιφανειακής απορροής
- ένα μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας του ταμιευτήρα της Κάρλας
- ένα μοντέλο προσομοίωσης της υδραυλικής επικοινωνίας του ταμιευτήρα με τον υπόγειο υδροφορέα
- ένα μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής
- ένα μοντέλο γεωστατιστικής προσέγγισης
- και ένα διαχειριστικό μοντέλο

6.1. Μοντέλο προσομοίωσης επιφανειακής απορροής

Το εννοιολογικό μοντέλο (UTHBAL) χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της επιφανειακής υδρολογίας (Λουκάς και συνεργάτες, 2003). Το μοντέλο UTHBAL έχει αναπτυχθεί στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας και έχει εφαρμοσθεί με επιτυχία σε λεκάνες απορροής στην Κύπρο (Λουκάς και συνεργάτες, 2003), στην Κρήτη (Christodoulaki *et al.*, 2003; Christodoulaki *et al.*, 2004), στη Θεσσαλία (Λουκάς και συνεργάτες, 2005a; Loukas *et al.*, 2006), στη λεκάνη απορροής της Κάρλας (Loukas *et al.*, 2008a; Sidiropoulos, 2013) και στη διασυννοριακή λεκάνη απορροής του Νέστου (Καμπράγκου, 2006) μεταξύ άλλων πολλών εφαρμογών. Το μοντέλο UTHBAL μπορεί να εφαρμοσθεί σε αδρομερή (Λουκάς και συνεργάτες, 2006), κατανεμημένη (φατνία κανάβου) ή ημι-κατανεμημένη μορφή (υπολεκάνες απορροής ή ομοιογενείς υδρολογικά

περιοχές) (Loukas et al., 2008a). Τα δεδομένα εισόδου στο μοντέλο για όλη τη λεκάνη, κάθε φατνίο του κανάβου, ομοιογενή περιοχή ή υπολεκάνη, ανάλογα με τη χωρική διακριτοποίησή του, ομαδοποιούνται και οργανώνονται στις ακόλουθες κατηγορίες: μετεωρολογικά δεδομένα (υετόπτωση, θερμοκρασία, δυνητική εξατμισοδιαπνοή), δεδομένα φυτοκάλυψης, και χρήσεων γης, εδαφολογικά δεδομένα, θέσεις και δεδομένα λιμνών, δεδομένα υπόγειου νερού και θέση και μορφή του κυρίου υδατορρεύματος της κάθε υπολεκάνης. Το μοντέλο υπολογίζει την πραγματική εξατμισοδιαπνοή, την εδαφική υγρασία, την κατείσδυση προς τον υπόγειο υδροφόρο, την επιφανειακή απορροή, την ενδορροή (εδαφική απορροή).

Αρχικό βήμα στην κατάστρωση του μοντέλου προσομοίωσης της απορροής, είναι ο διαχωρισμός της υετόπτωσης σε βροχή και χιόνι. Ο διαχωρισμός αυτός καθορίζεται, κυρίως από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ορίστηκε ένα όριο θερμοκρασίας κάτω από το οποίο όλη η υετόπτωση είναι χιόνι και ένα δεύτερο, πάνω από το οποίο είναι βροχή. Έτσι, για μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 12.22° C θεωρήθηκε ότι όλο το ποσοστό της υετόπτωσης είναι βροχή, ενώ για μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες μικρότερες από -10° C, όλο το ποσοστό της συνολικής υετόπτωσης είναι χιόνι. Για θερμοκρασίες μεταξύ των δύο αυτών τιμών το χιόνι υπολογίζεται ως ποσοστό της υετόπτωσης που παρατηρήθηκε. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε γραμμική σχέση ως προς τη θερμοκρασία (Semadeni – Davies, A., 1997):

$$\%S = -4.5 \cdot T + 55 \quad \text{για } -10^{\circ}\text{C} \leq T \leq 12.22^{\circ}\text{C} \quad (6.1)$$

Δοκιμάζοντας τη σχέση αυτή διαπιστώθηκε ότι για τιμές θερμοκρασίας κοντά στο μηδέν, η συνολική απορροή είχε αποκλίσεις από τις παρατηρούμενες τιμές κάτι που πιθανόν οφειλόταν στη γραμμική σχέση μεταξύ θερμοκρασίας-ποσοστού χιονιού. Δοκιμάστηκε και διαπιστώθηκε ότι βελτιώνονται τα αποτελέσματα όταν χρησιμοποιηθεί αντί για γραμμική, λογιστική (logistic) σχέση. Λογιστική σχέση έχει χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχο μοντέλο σε μελέτη για τη βόρεια λεκάνη απορροής του Στρυμόνα με σχετικά παρόμοια κλιματολογικά χαρακτηριστικά και έδωσε επίσης καλύτερα αποτελέσματα (Knight et al, 2001). Σύμφωνα λοιπόν με τη λογιστική σχέση, το ποσοστό της υετόπτωσης που είναι χιόνι δίνεται από τη παρακάτω έκφραση:

$$\begin{aligned} \%S &= 0, & \text{για } T &\geq 12.22^{\circ}\text{C} \\ \%S &= \frac{100}{1.35^T \cdot 1.61 + 1}, & \text{για } -10^{\circ}\text{C} &\leq T \leq 12.22^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (6.2)$$

$$\%S = 100, \quad \text{για } T \leq -10^{\circ}\text{C}$$

όπου T είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία.

Έχοντας, λοιπόν, ως δεδομένα από μετεωρολογικούς σταθμούς, τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και τη μηνιαία υετόπτωση, υπολογίστηκε η μηνιαία χιονόπτωση.

Ο επόμενος υπολογισμός αφορά τη δυνητική μηνιαία τήξη χιονιού εκφρασμένη σε mm/μήνα. Η τήξη χιονιού επηρεάζεται από μια σειρά παραμέτρων όπως, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η ηλιακή ακτινοβολία, η ατμοσφαιρική πίεση, η ταχύτητα του ανέμου και κυρίως η φυτοκάλυψη. Οι παραπάνω παράμετροι είναι δύσκολο να

υπολογιστούν καθώς δεν υπάρχουν ανάλογα δεδομένα. Γνωρίζοντας την ημερήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος, μπορεί να υπολογιστεί η τήξη χιονιού από τη σχέση (degree-day method) (Semadeni – Davies, A., 1997):

$$SM = C_m \cdot T \cdot N \quad (6.3)$$

όπου

- C_m είναι παράμετρος με μονάδες mm/°C/ημέρα,
- T ημερήσια θερμοκρασία,
- N ο αριθμός των ημερών σε κάθε μήνα

Στη συγκεκριμένη μελέτη, όπου τα θερμοκρασιακά δεδομένα ήταν μηνιαία, η παραπάνω σχέση μετατράπηκε ως εξής:

$$SM = C_m \cdot T_{\mu\eta\nu\iota\alpha\acute{\alpha}} (J) \quad (6.4)$$

όπου πλέον η παράμετρος C_m έχει μονάδες mm/°C/month και σύμφωνα με αυτή δίνεται η δυνητική μηνιαία τήξη χιονιού.

Η παράμετρος C_m αλλάζει ανάλογα με την εκάστοτε υπό εξέταση λεκάνη αφού εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη φυτοκάλυψη, τη μορφολογία και την κλιματολογία της περιοχής (πεδινή, ορεινή). Έτσι, για κάθε λεκάνη, η τιμή της παραμέτρου πρέπει να ρυθμιστεί κατά τη διαδικασία ρύθμισης των παραμέτρων (calibration) και αποτελεί μια επιπλέον παράμετρο των υδρολογικών μοντέλων. Διαπιστώθηκε ότι υπάρχει σχέση μεταξύ της παραμέτρου C_m και του μέσου υψομέτρου της λεκάνης καθώς και ότι οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 5 – 10 mm/°C/month.

Το ισοδύναμο ύψος χιονιού του συσσωρευμένου χιονιού, SWE_{sp} , εκτιμάται από:

$$SWE_{sp}(J) = SWE_{sp}(J-1) + S(J) - SM(J) \quad (6.5)$$

όπου $S(J)$ είναι το χιόνι που κατακρημνίστηκε κατά τη διάρκεια του μήνα J και ισούται με:

$$S(J) = \%S \cdot P(J) \quad (6.6)$$

όπου $P(J)$ είναι η συνολική του μήνα J .

Το προτεινόμενο μοντέλο διακρίνει τη συνολική απορροή σε τρεις συνιστώσες απορροής, δηλαδή την επιφανειακή απορροή, την ενδιάμεση ή επιδερμική απορροή, και τη βασική απορροή ή απορροή που προέρχεται από την εκροή του υδροφορέα. Σύμφωνα με το μοντέλο, πρώτη προτεραιότητα στο υδατικό ισοζύγιο πριν τη δημιουργία απορροής αποτελεί η ικανοποίηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής. Η μηνιαία πραγματική εξατμισοδιαπνοή E_a του μήνα J εξαρτάται από τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία του μήνα J και τη μέση επιφανειακή δυνητική εξατμισοδιαπνοή E_p του μήνα J . Η μηνιαία πραγματική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται από τη σχέση που πρότειναν οι Vandewiele και Win (Vandewiele and Win, 1998):

$$E_a(J) = \min \{ E_p(J) * (1 - \alpha^{S_{moist}(J)/E_p(J)}), S_{moist}(J) \} \quad (6.7)$$

όπου

- $S_{moist}(J)$ είναι η διαθέσιμη εδαφική υγρασία του μήνα J για πλήρωση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής,
- α ένας συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ($0 \leq \alpha \leq 1$) και
- $E_p(J)$ η δυνητική εξατμισοδιαπνοή του μήνα J

Η επιφανειακή απορροή, SR , του μήνα J υπολογίζεται ως:

$$SR(J) = (1 - K) * (AS_{moist}(J) - S_{max}), \quad \text{για } AS_{moist}(J) > S_{max} \quad (6.8)$$

$$SR(J) = 0, \quad \text{για } AS_{moist}(J) \leq S_{max} \quad (6.9)$$

όπου:

- $AS_{moist}(J) = S_{moist}(J) - E_a(J)$ η υπολειπόμενη εδαφική υγρασία του μήνα J μετά την ικανοποίηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής
- $S_{max} = \frac{25400}{CN} - 254$ η μέγιστη εδαφική υγρασία
- CN το Curve Number της Soil Conservation Method (SCS, 1972), ($0 \leq CN \leq 100$)
- K ο συντελεστής κατείσδυσης ($0 \leq K \leq 1$)

Η διήθηση D προς τον υπόγειο υδροφορέα του μήνα J υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$D(J) = K * (AS_{moist}(J) - S_{max}), \quad \text{για } AS_{moist}(J) > S_{max} \quad (6.10)$$

$$D(J) = 0, \quad \text{για } AS_{moist}(J) \leq S_{max} \quad (6.11)$$

Η διαθέσιμη εδαφική υγρασία N_{moist} του μήνα J , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_{moist}(J) = AS_{moist}(J) - SR(J) - D(J) \quad (6.12)$$

Η ενδιάμεση απορροή από την εδαφική υγρασία MR του μήνα J υπολογίζεται ως:

$$MR(J) = \beta * [N_{moist}(J-1) + N_{moist}(J)] \quad (6.13)$$

όπου β είναι ο συντελεστής ενδιάμεσης απορροής ($0 \leq \beta \leq 1$).

Η υπολειπόμενη υγρασία NS_{moist} στο τέλος του μήνα J υπολογίζεται από τη σχέση:

$$NS_{moist}(J) = N_{moist}(J) - MR(J) \quad (6.14)$$

Η διαθέσιμη εδαφική υγρασία για την πλήρωση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής του επόμενου μήνα $J+1$ είναι:

$$S_{moist}(J+1) = P(J+1) + NS_{moist}(J) \quad (6.15)$$

Η βασική απορροή ή απορροή από την εκροή του υδροφορέα Q_g του μήνα J υπολογίζεται από τη διήθηση, D , του προηγούμενου μήνα $J-1$, από τη σχέση:

$$Q_g(J) = \gamma * D(J-1) \quad (6.16)$$

όπου γ είναι ο συντελεστής βασικής απορροής ή συντελεστής εκροής του υδροφορέα ($0 \leq \gamma \leq 1$).

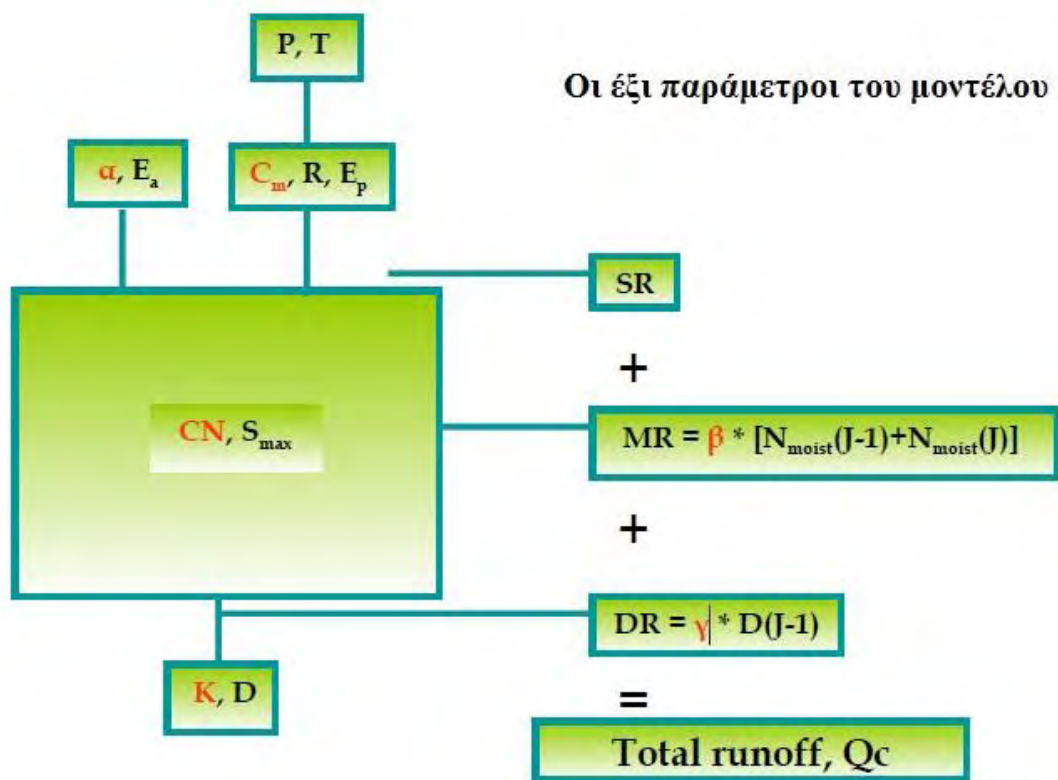
Η επαναφόρτιση του υδροφορέα R_g είναι ίση με:

$$R_g = (1 - \gamma) * D(J - 1) \quad (6.17)$$

Τέλος, η συνολική απορροή Q_c υπολογίζεται ως άθροισμα των επιμέρους συνιστωσών της απορροής, δηλαδή της επιφανειακής απορροής, της ενδιάμεσης απορροής και της βασικής απορροής:

$$Q_c(J) = SR(J) + MR(J) + Q_g(J) \quad (6.18)$$

Το παραπάνω μοντέλο υδρολογικού ισοζυγίου είναι ένα μοντέλο έξι παραμέτρων (Σχήμα 6.1). Είναι όμως δυνατόν, δύο από τις παραμέτρους του μοντέλου, το CN και ο συντελεστής κατείσδυσης K , να εκτιμηθούν άμεσα από εδαφολογικούς και γεωλογικούς αναλογικούς ή ψηφιακούς χάρτες καθώς και από χάρτες χρήσεων γης, περιορίζοντας έτσι σημαντικά τον αριθμό των παραμέτρων που πρέπει να προσδιορισθούν με τη βοήθεια μεθόδων βελτιστοποίησης.



Σχήμα 6. 1. Οι έξι παράμετροι (με κόκκινη γραμματοσειρά) για τις οποίες ρυθμίζεται το μοντέλο.

6.2. Μοντέλο προσομοίωσης λειτουργίας του ταμιευτήρα

Το μοντέλο ισοζυγίου λίμνης/ταμιευτήρα που έχει αναπτυχθεί στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας (UTHRL) χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του υδατικού ισοζυγίου

του ταμιευτήρα. Το μοντέλο δέχεται ως δεδομένα εισόδου μετεωρολογικές παρατηρήσεις (π.χ. υετόπτωση και θερμοκρασία), εισροή επιφανειακής απορροής στη λίμνη/ταμιευτήρα, άλλες εισροές νερού στη λίμνη/ταμιευτήρα, απολήψεις από τη λίμνη/ταμιευτήρα και υπολογίζει τις υδατικές απώλειες της λίμνης/ταμιευτήρα, τον διαθέσιμο όγκο νερού της λίμνης/ταμιευτήρα, τη στάθμη της λίμνης/ταμιευτήρα και την υπερχειλίση της λίμνης/ταμιευτήρα. Το μοντέλο UTHRL έχει εφαρμοσθεί με επιτυχία στην προσομοίωση της λειτουργίας ενός συστήματος ταμιευτήρων για την εκτροπή του άνω ρου του Αχελώου Ποταμού (Λουκάς και συνεργάτες, 2005a), στην προσομοίωση και διαχείριση του ταμιευτήρα της Κάρλας (Λουκάς και συνεργάτες, 2005b; Sidiropoulos, 2013), και στη διαχείριση των λεκανών απορροής της Θεσσαλίας (Loukas et al., 2007; Mylopoulos, et al., 2009).

Σύμφωνα με τη μέθοδο χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου οι εισροές ενός σημαντικού αριθμού ετών (ή αν κριθεί απαραίτητο παράγονται από το υπάρχον δείγμα συνθετικά δεδομένα με τα ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά.). Η γενική εξίσωση που περιγράφει τη λειτουργία ενός ταμιευτήρα με χρονικό βήμα τον μήνα, είναι η ακόλουθη:

$$V_i = V_{i-1} + Q_i - E_i - A_i - Y_i \quad (6.19)$$

όπου:

- V_i, V_{i-1} είναι ο αποθηκευμένος όγκος νερού στον ταμιευτήρα του μήνες $i, i-1$, αντίστοιχα
- Q_i είναι η εισροή στον ταμιευτήρα το μήνα i
- E_i είναι η καθαρή απώλεια του ταμιευτήρα το μήνα i
- A_i είναι η πραγματική απόληψη κατά τον μήνα i
- Y_i είναι η υπερχειλίση κατά το μήνα i .

Για μία δεδομένη τιμή της μέγιστης ωφέλιμης χωρητικότητας S του ταμιευτήρα, ισχύουν οι παρακάτω περιπτώσεις:

1. Αν $V_i > S$:

$$V_i = S$$

$$A_i = B_i$$

$$Y_i = V_{i-1} + Q_i - E_i - A_i - S$$

όπου B_i η επιθυμητή απόληψη του μήνα i .

2. Αν $0 < V_i < S$

$$V_i = V_{i-1} + Q_i - E_i - A_i$$

$$A_i = B_i$$

$$Y_i = 0$$

3. Αν $V_i = 0$

$$A_i = V_{i-1} + Q_i - E_i$$

$$Y_i=0$$

Το μέγεθος της επιθυμητής απόληψης B_{di} καθορίζει τον τρόπο λειτουργίας του ταμιευτήρα και κατ' επέκταση τον αριθμό των αστοχιών του έργου σε μια δεδομένη χρονική περίοδο. Η πραγματική απόληψη B_{ri} είναι ίση με την επιθυμητή B_{di} , όταν υπάρχει η διαθέσιμη ποσότητα για απόληψη και είναι μικρότερη όταν δεν ικανοποιείται το κριτήριο της Κατώτατης Στάθμης Άρδευσης. Οι απώλειες από τη λεκάνη κατάκλισης (ταμιευτήρας), οφείλονται σε εξάτμιση από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού, στην κατείδσδυση προς τον υπόγειο υδροφορέα και στις απολήψεις για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών. Συνήθως, για τον υπολογισμό της εξάτμισης χρησιμοποιούνται μετρημένες τιμές από εξατμισίμετρο ή ημιανλυτικές υπολογιστικές μέθοδοι. Η αναγωγή του ύψους των καθαρών απωλειών σε αντίστοιχο όγκο γίνεται πολλαπλασιάζοντας το ύψος των καθαρών απωλειών με το εμβαδόν της ελεύθερης επιφάνειας του νερού. Για να υπολογισθεί το εμβαδόν της ελεύθερης επιφάνειας του νερού χρησιμοποιούνται οι χαρακτηριστικές καμπύλες στάθμης-χωρητικότητας, και στάθμης-ελεύθερης επιφάνειας του Σχήματος 5.17 του ταμιευτήρα και από αυτές εκτιμούνται οι σχέσεις χωρητικότητας ταμιευτήρα-ελεύθερης επιφάνειας.

6.3. Μοντέλο προσομοίωσης της υδραυλικής επικοινωνίας του ταμιευτήρα με τον υπόγειο υδροφορέα

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι η υπορουτίνα LAK3 (Merritt and Konikow, 2000) του εμπορικού προγράμματος GMS. Για τον προσδιορισμό της υδραυλικής σύνδεσης του ταμιευτήρα με τον υδροφορέα απαιτείται μία μέθοδος υπολογισμού της ποσότητας του νερού που διαρρέει προς τον υπόγειο υδροφορέα διαμέσου των ιζημάτων του πυθμένα του ταμιευτήρα. Ο παραπάνω υπολογισμός αποτελεί εφαρμογή του Νόμου του Darcy. Για προσομοιώσεις, σε μεταβαλλόμενες συνθήκες, η στάθμη του ταμιευτήρα υπολογίζεται στο τέλος κάθε χρονικού βήματος βάσει υδατικού ισοζυγίου. Οι όροι που αποτελούν το υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα είναι η βροχόπτωση, η εξατμισοδιαπνοή, η επιφανειακή απορροή και οι απολήψεις για ανθρώπινες δραστηριότητες (π.χ άρδευση). Για προσομοιώσεις σε συνθήκες δυναμικής ισορροπίας, ο υπολογισμός της στάθμης του ταμιευτήρα γίνεται βάσει της μεθόδου του Νεύτωνα. Ο νόμος του Darcy, που χρησιμοποιείται σε προσομοιώσεις με μεταβαλλόμενες συνθήκες, εκφράζεται από τη σχέση:

$$q = K \frac{h_l - h_a}{\Delta l} \quad (6.20)$$

όπου:

- q η ταχύτητα του Darcy που εκφράζει τη διαρροή του ταμιευτήρα προς τον υπόγειο υδροφορέα [L/T]
- K η υδραυλική αγωγιμότητα των υλικών (ιζημάτων) του πυθμένα του ταμιευτήρα προς τον υπόγειο υδροφορέα [L/T]
- h_l η στάθμη της επιφάνειας του ταμιευτήρα [L]

- h_a το φορτίο του υπόγειου υδροφορέα [L]
- Δl η κάθετη απόσταση των σημείων όπου είναι γνωστές οι παράμετροι h_l και h_a [L]

Σε προσομοιώσεις μοντέλων, για πρακτικούς κυρίως λόγους, είναι προτιμότερο η ταχύτητα q να μετατρέπεται σε ογκομετρική ποσότητα ροής Q . Έστω A η επιφάνεια του προς προσομοίωση ταμιευτήρα, τότε η ποσότητα Q θα είναι $q \cdot A$. Άρα η εξίσωση 6.20 γίνεται:

$$Q = \frac{K \cdot A}{\Delta l} (h_l - h_a) \quad (6.21)$$

όπου:

- $K \cdot A / \Delta l = c$ η αγωγιμότητα [L^2/T]
- $K / \Delta l$ η διαρροή πυθμένα [L^{-1}]

Για την προσομοίωση της ροής του νερού από τον πυθμένα της λίμνης στον υπόγειο υδροφορέα είναι συνετό να ορίζεται μία ενιαία υδραυλική αγωγιμότητα που να περιέχει τα χαρακτηριστικά τόσο των υλικών του πυθμένα όσο και του υδροφορέα.

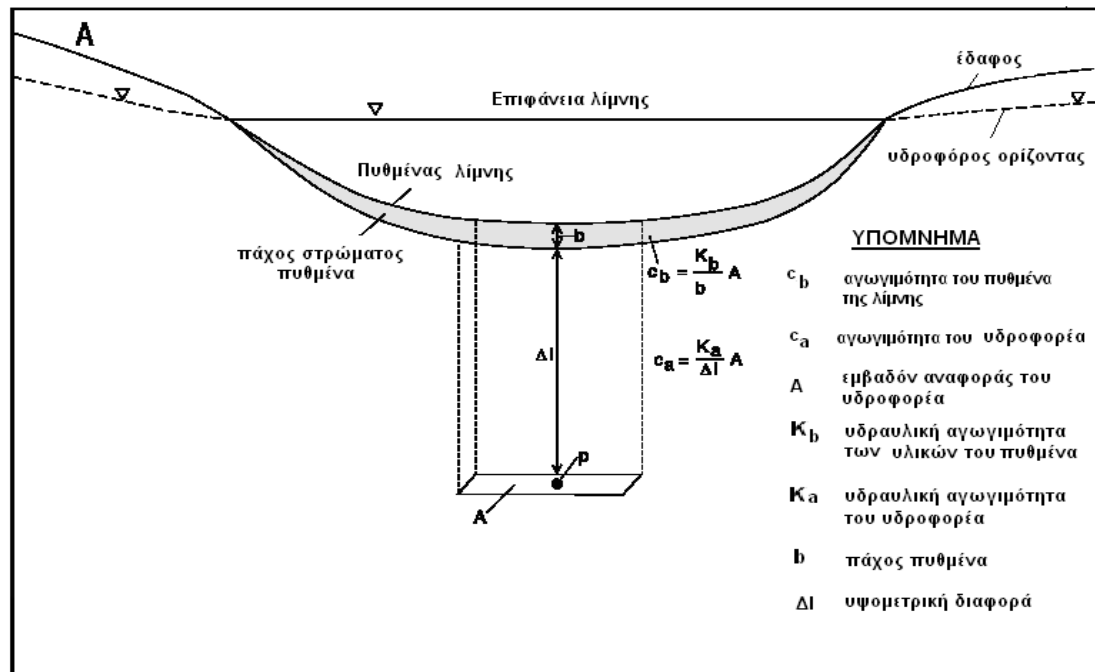
$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_b} + \frac{1}{c_a} \quad (6.22)$$

ή ισοδύναμα:

$$c = \frac{A}{\frac{b}{K_b} + \frac{\Delta l}{K_a}} \quad (6.23)$$

όπου:

- c η αγωγιμότητα του συστήματος ταμιευτήρα- υδροφορέα [L^2/T]
- c_b η αγωγιμότητα του πυθμένα του ταμιευτήρα [L^2/T]
- c_a η αγωγιμότητα του υδροφορέα [L^2/T]
- K_b η υδραυλική αγωγιμότητα των υλικών (ιζημάτων) του πυθμένα του ταμιευτήρα προς τον υπόγειο υδροφορέα [L/T]
- K_a η υδραυλική αγωγιμότητα των υλικών του υδροφορέα [L/T]
- b το πάχος του πυθμένα του ταμιευτήρα [L]
- A το εμβαδόν της προς προσομοίωσης περιοχής [L^2]



Σχήμα 6. 2. Σχηματική παράσταση των παραπάνω όρων

Η σύνδεση μεταξύ ταμιευτήρα και υπόγειου υδροφορέα γίνεται υπολογίζοντας στο τέλος κάθε χρονικού βήματος ένα υδατικό ισοζύγιο για τη λίμνη το οποίο είναι ανεξάρτητο από το υδατικό ισοζύγιο του υπόγειου υδροφορέα:

$$h_t^n = h_t^{n-1} + \Delta t \frac{p - e + rnf - w - sp}{As} \quad (6.24)$$

όπου

- h_t^n η στάθμη του ταμιευτήρα για το συγκεκριμένο χρονικό βήμα [L].
- h_t^{n-1} η στάθμη του ταμιευτήρα για το προηγούμενο χρονικό βήμα [L].
- Δt η διάρκεια του χρονικού βήματος [T].
- p η βροχόπτωση κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος [L^3/T].
- e η εξατμισοδιαπνοή από την επιφάνεια του ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος [L^3/T].
- rnf η επιφανειακή απορροή κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος
- w οι απολήψεις από τον ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος [L^3/T].
- sp η διαρροή από τον ταμιευτήρα στον υπόγειο υδροφορέα κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος [L^3/T]. Ο όρος sp είναι ίσος με το άθροισμα όλων των ποσοτήτων διαρροών που αντιστοιχούν σε κάθε κελί του καννάβου και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$sp = \sum_m^M c_m (h_l - h_{am}) \quad (6.25)$$

όπου:

- h_{am} η στάθμη (φορτίο) του υδροφορέα στο κελί m
- c_m η κατακόρυφη υδραυλική αγωγιμότητα στο κελί m, η οποία ισούται:

$$c_m = \frac{K_b A_s}{b} \quad (6.26)$$

όπου:

- A_s η έκταση της ελεύθερης επιφάνειας του ταμιευτήρα [L^2] στην αρχή του χρονικού βήματος
- K_b η υδραυλική αγωγιμότητα των υλικών (ιζημάτων) του πυθμένα του ταμιευτήρα προς τον υπόγειο υδροφορέα [L/T]
- b το πάχος του πυθμένα του ταμιευτήρα [L]

Η ποσότητα K_b/b καλείται συντελεστής διαρροής και έχει μονάδες [T^{-1}]. Λόγω της ενιαίας αντιμετώπισης των δύο κατακόρυφων υδραυλικών αγωγιμοτήτων, ο λόγος της ενιαίας Kz ως προς την απόσταση Δl είναι η παράμετρος για την οποία ρυθμίζεται το μοντέλο.

6.4. Μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής

Για την προσομοίωση της κίνησης του υπόγειου νερού σε κοκκώδη σχηματισμούς χρησιμοποιείται από πολλούς ερευνητές ο κώδικας Modflow (Modular three dimensional finite difference ground water flow model) της Αμερικανικής Υπηρεσίας Γεωλογικών Ερευνών (U.S.G.S.) Το πρόγραμμα στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση μιας κύριας διαφορικής εξίσωσης, η οποία προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης διατήρησης της μάζας και του νόμου του Darcy. Πρόκειται για ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών με επίλυση των εξισώσεων στο κέντρο των κυψελίδων του καννάβου. Εφαρμόζεται τόσο σε μόνιμα, όσο και σε μη μόνιμα προβλήματα ροής και υπολογίζει τις μεταβολές του φορτίου στα σημεία πεδίου σε όλη τη διάρκεια του χρόνου για ομογενή – ετερογενή, ισότροπο ή ανισότροπο υδροφορέα. Επίσης έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης μεγάλου αριθμού πηγαδιών, της κατείσδυσης, της επίδρασης στραγγιστηριών και ποταμών και λιμνών κ.α., όπως θα παρουσιαστούν παρακάτω. Στην εν λόγω έρευνα, το μοντέλο υποστηρίχθηκε από το εμπορικό πρόγραμμα GMS (Groundwater Modeling System)

6.4.1. Μαθηματικό Υπόβαθρο του Modflow

Έστω ένας στοιχειώδης όγκος δV με περιεχόμενη μάζα δM . Η μεταβολή της μάζας αυτής ανά μονάδα όγκου και χρόνου είναι :

$$\frac{\partial(\delta M)}{\partial t} / \delta V \quad (6.27)$$

Αν \vec{q} θεωρηθεί η ταχύτητα Darcy και ρ η πυκνότητα του ρευστού, τότε η ροή της μάζας ανά μονάδα χρόνου θα είναι $\rho \cdot \vec{q}$. Όταν το ρευστό εισέρχεται ή εξέρχεται από το χώρο κατά $W(x,y,z,t)$ ανά μονάδα χρόνου και μονάδα όγκου, η προστιθέμενη μάζα ανά μονάδα χρόνου και όγκου είναι $\rho \cdot W$. Επειδή η μάζα διατηρείται, θα ισχύει :

$$\oint_{\delta V} \rho \cdot \vec{q} \cdot d\vec{S} + \iiint_V \rho \cdot W \cdot dV + \iiint_V \left(\frac{\partial(\delta M)}{\partial t} / \delta V \right) \cdot dV = 0 \quad (6.28)$$

όπου ο πρώτος όρος είναι το επιφανειακό ολοκλήρωμα, που λαμβάνεται σε όλη την κλειστή επιφάνεια του δV και οι άλλοι δύο όροι είναι ολοκληρώματα όγκου που εκτείνονται στον όγκο του στοιχείου. Σύμφωνα με το θεώρημα της απόκλισης, το επιφανειακό ολοκλήρωμα γράφεται ως ολοκλήρωμα όγκου :

$$-\oint \rho \cdot \vec{q} \cdot d\vec{S} = -\iiint \nabla(\rho \cdot \vec{q}) \cdot dV \quad (6.29)$$

Κατά τον Hantush (1964) :

$$\frac{d(\delta M)}{\rho \cdot \delta V} = \frac{d(\delta V_w)}{\delta V} = S_s \cdot d\phi \quad (6.30)$$

όπου S_s είναι η ειδική αποθηκευτικότητα με διαστάσεις L^{-1} . Έτσι η εξίσωση 6.28 γράφεται :

$$-\iiint \left\{ \nabla(\rho \cdot \vec{q}) - \rho \cdot W + \rho \cdot S_s \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} \cdot dV = 0 \quad (6.31)$$

ή

$$-\left[\frac{\partial(\rho \cdot q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot q_z)}{\partial z} \right] + \rho \cdot W = \rho \cdot S_s \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (6.32)$$

Σύμφωνα με τον Hantush (1964), η μεταβολή της πυκνότητας του νερού είναι πολύ μικρή και θεωρείται σταθερή στα περισσότερα προβλήματα υπόγειας υδραυλικής, και έτσι μπορεί να παραληφθεί από την εξίσωση 6.32. Οι συνιστώσες της ταχύτητας Darcy στις τρεις διαστάσεις, δίνονται από τη σχέση :

$$\left. \begin{aligned} q_x &= -K_{xx} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_{yy} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_{zz} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z} = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (6.33)$$

Η εξίσωση 6.32 λόγω της 6.33 γίνεται

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) - W = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6.34)$$

όπου:

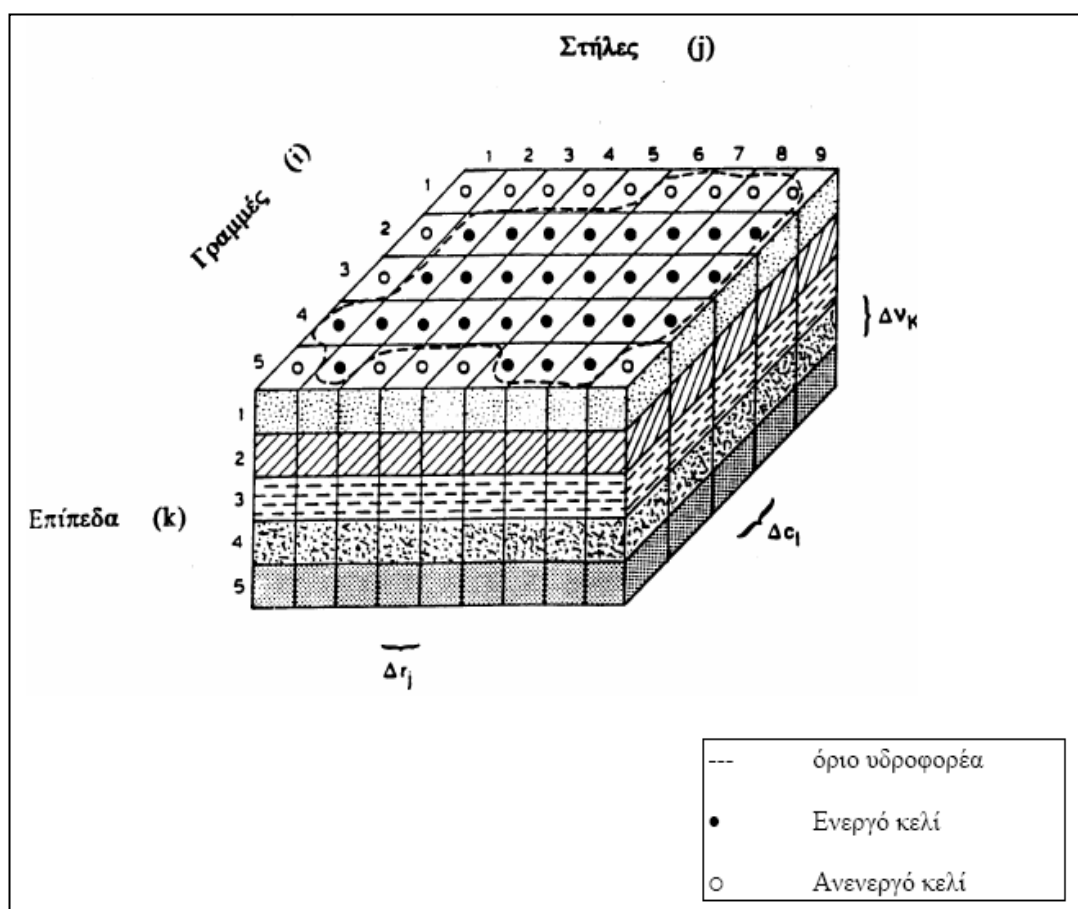
- K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} , οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά μήκος των x, y και z αξόνων συντεταγμένων, οι οποίες θεωρούνται να είναι παράλληλοι προς τους κυρίους άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας [L^2T^{-1}]
- H , το υδραυλικό φορτίο [L]
- W , η παροχή ανά μονάδα χρόνου που προέρχεται από εισροές ή εκροές του νερού [T^{-1}]
- S_y , η ειδική απόδοση του πορώδους μέσου [L^{-1}] και
- T , ο χρόνος [T]

Η εξίσωση 6.34 είναι η τρισδιάστατη διαφορική εξίσωση με μερικές παραγώγους, που περιγράφει την κίνηση του υπόγειου νερού σε κοκκώδεις υδροφορείς και χρησιμοποιείται από μοντέλο MODFLOW. Η εξίσωση αυτή περιγράφει την κίνηση του υπόγειου νερού υπό συνθήκες μη μόνιμης ροής, σε ετερογενές και ανισότροπο μέσο, με την προϋπόθεση ότι οι κύριοι άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας, ταυτίζονται με τους άξονες του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Τα $S_s, K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$ στην εξίσωση 6.34 μπορούν να είναι συναρτήσεις του χώρου ($S_s = S_s(x,y,z), K_{xx} = K_{xx}(x,y,z), K_{yy} = K_{yy}(x,y,z), K_{zz} = K_{zz}(x,y,z)$) και το W συνάρτηση του χώρου όσο και του χρόνου ($W = W(x,y,z,t)$). Η εξίσωση 6.34 σε συνδυασμό με τις οριακές συνθήκες στα όρια του υδροφορέα και με καθορισμό αρχικής συνθήκης πιεζομετρίας, αποτελεί ένα μαθηματικό μοντέλο ενός υπόγειου υδροφορέα. Εκτός από περιπτώσεις πολύ απλών συστημάτων υδροφορέων, αναλυτικές λύσεις της 6.34 είναι πολύ δύσκολο και τις περισσότερες φορές αδύνατο να επιτευχθούν. Γι' αυτόν τον λόγο έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια μαθηματικά μοντέλα, που στηρίζονται σε αριθμητικές μεθόδους επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων και δίνουν προσεγγιστικές λύσεις. Τέτοιες αριθμητικές μέθοδοι είναι οι πεπερασμένες διαφορές, τα πεπερασμένα στοιχεία, τα πολλαπλά κελιά, τα οριακά στοιχεία κ.α. Το μοντέλο MODFLOW με τη βοήθεια του οποίου γίνεται η επίλυση της 6.34, χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στις τρεις διαστάσεις όπου το συνεχές σύστημα που περιγράφεται από αυτή, αντικαθίσταται από έναν πεπερασμένο αριθμό διακριτών σημείων τόσο ως προς τον χρόνο όσο και ως προς τον χώρο. Οι μερικές παράγωγοι αντικαθίστανται από όρους που υπολογίζονται ως διαφορές στην πιεζομετρία για τα συγκεκριμένα αυτά σημεία και η διαδικασία αυτή τελικά οδηγεί σε συστήματα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων με πεπερασμένες διαφορές και συγκεκριμένα πίσω διαφορές. Η αριθμητική λύση των συστημάτων αυτών δίνει τιμές για το φορτίο σε συγκεκριμένα σημεία και για συγκεκριμένα χρονικά βήματα. Οι τιμές αυτές αποτελούν μία προσέγγιση της αναλυτικής λύσης της εξίσωσης η οποία, σε αντίθεση με την αριθμητική λύση, δίνει συνεχείς τιμές της κατανομής φορτίου, για οποιοδήποτε σημείο και για οποιοδήποτε χρόνο.

6.4.2. Διακριτοποίηση

Στο Σχήμα 6.3 φαίνεται η χωρική διακριτοποίηση ενός υδροφορέα με ένα πλέγμα ορθογώνιων υποπεριοχών, προσανατολισμένων προς το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, που λέγονται κελιά (cells). Κάθε υποπεριοχή αποτελείται από ένα χαρακτηριστικό σημείο, το οποίο είναι το κέντρο βάρους του κελιού και στο οποίο ζητείται να υπολογιστεί η τιμή του h . Χρησιμοποιούνται δείκτες (i,j,k) όπου :

- $i = 1, 2, \dots, nrow$, αντιπροσωπεύει τον αριθμό των γραμμών,
- $j = 1, 2, \dots, ncol$, αντιπροσωπεύει τον αριθμό των στηλών,
- $k = 1, 2, \dots, nlay$, αντιπροσωπεύει τον αριθμό των επιπέδων στην κατακόρυφη διεύθυνση,



Σχήμα 6. 3. Χωρική διακριτοποίηση ενός τρισδιάστατου υδροφορέα (Ψιλοβίκος, 1999).

Κατά τον σχηματισμό των εξισώσεων του μοντέλου, έγινε η θεώρηση, ότι τα επίπεδα αντιπροσωπεύουν οριζόντιες υδρογεωλογικές μονάδες. Έτσι ο δείκτης k σημαίνει αλλαγές πάνω στον κατακόρυφο άξονα z με φορά από πάνω προς τα κάτω. Το ίδιο ισχύει και για τους άλλους δύο άξονες. Τόσο οι γραμμές, που είναι παράλληλες στον άξονα x όσο και οι στήλες που είναι παράλληλες στον y , δίνουν μεταβολές κατά τη διεύθυνση y και x αντίστοιχα. Έτσι το μήκος ενός κελιού κατά τη διεύθυνση των γραμμών σε μια δεδομένη στήλη j γράφεται Δx_j , ενώ κατά τη διεύθυνση των στηλών σε

μια δεδομένη γραμμή i γράφεται Δc_i και το πάχος του κελιού για ένα δεδομένο επίπεδο Δv_k . Δηλαδή ένα κελί με συντεταγμένες $(i,j,k) = (4,8,3)$ έχει όγκο $\Delta V = \Delta r_8 \Delta c_4 \Delta v_3$.

6.4.3. Εξίσωση πεπερασμένων διαφορών

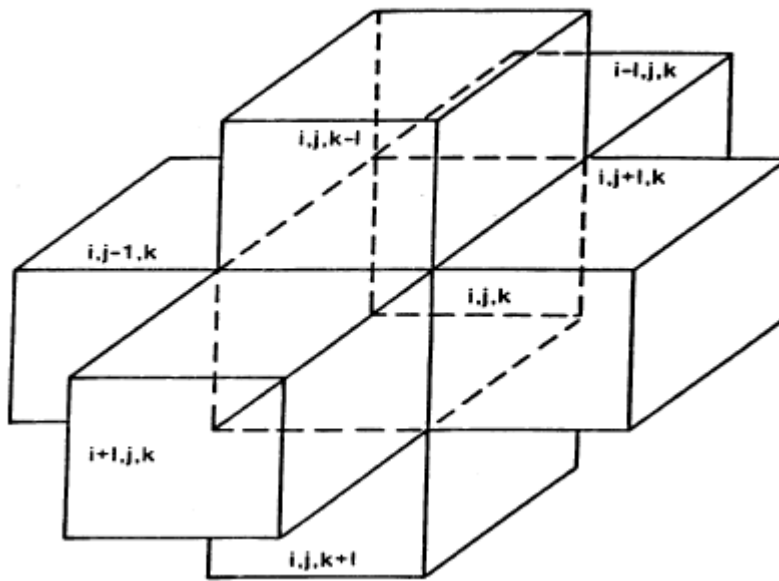
Η ανάπτυξη της εξίσωσης 6.34 υπό μορφή πεπερασμένων διαφορών, απαιτεί την εφαρμογή της εξίσωσης συνέχειας. Με την προϋπόθεση ότι η πυκνότητα ρ του υπόγειου νερού είναι σταθερή, η εξίσωση συνέχειας που εκφράζει το ισοζύγιο της ροής για ένα κελί, δίνεται από την έκφραση :

$$\sum Q_i = S_s \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \Delta V \quad (6.35)$$

όπου:

- $\sum Q_i$ το σύνολο των πραγματοποιούμενων εισροών ή εκροών στα όρια του κελιού που προέρχονται από γειτονικά κελιά [L^3T^{-1}]
- S_s η ειδική αποθηκευτικότητα ή το αποτελεσματικό πορώδες ανά μέτρο βάθους του υδροφορέα. Αυτή μπορεί να οριστεί και σαν ο όγκος του νερού, που αντλείται ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα μεταβολής της πιεζομετρίας [L^{-1}]
- ΔV ο όγκος του κελιού [L^3]
- Δh η μεταβολή της πιεζομετρίας [L]
- Δt το χρονικό βήμα [T]

Οι όροι στο δεξί μέλος της εξίσωσης 6.35 είναι ισοδύναμοι με τον όγκο του νερού που αποθηκεύεται σε ένα χρονικό διάστημα Δt , κατά το οποίο παρατηρείται αλλαγή της στάθμης κατά Δh . Σύμφωνα με το Σχήμα 6.4 από την διακριτοποίηση της εξίσωσης 6.35 προκύπτει ένα κεντρικό κελί (i,j,k) , και έξι γειτονικά του τα $(i-1,j,k)$, $(i+1,j,k)$, $(i,j-1,k)$, $(i,j+1,k)$, $(i,j,k-1)$, $(i,j,k+1)$.



Σχήμα 6. 4. Το κελί (i,j,k) και τα γειτονικά του (Ψιλοβίκος, 1999).

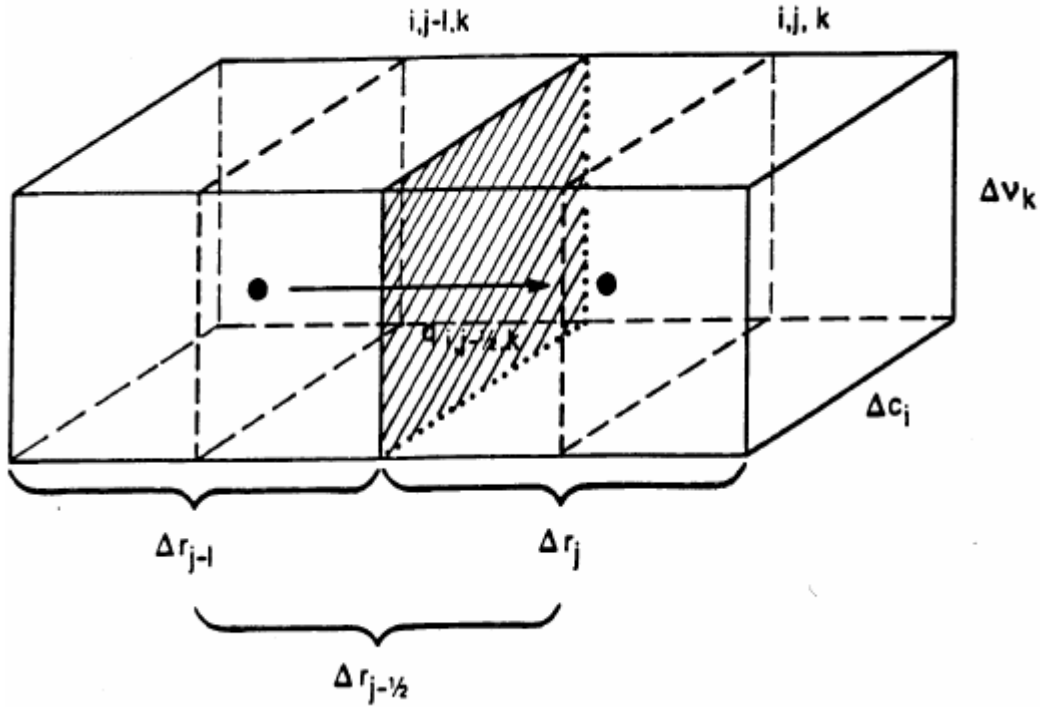
Η εισροή στο (i,j,k) λαμβάνεται με θετικό πρόσημο, ενώ η εκροή με αρνητικό. Σύμφωνα με τον νόμο του Darcy, για τις ροές των 6 γειτονικών κελιών προς το κεντρικό (i,j,k) , θα ισχύει :

1) Ροή από το κελί $(i,j-1,k)$, στο (i,j,k) κατά τη διεύθυνση γραμμών (Σχ. 6.5) :

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \cdot \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (6.36)$$

όπου:

- $h_{i,j,k}$, το φορτίο στον κόμβο (i,j,k) [L]
- $h_{i,j-1,k}$, το φορτίο στον κόμβο $(i,j-1,k)$ [L]
- $q_{i,j-1/2,k}$, η παροχή στην κοινή πλευρά των ορθογώνιων στοιχείων (i,j,k) και $(i,j-1,k)$ [L^3T^{-1}]
- $KR_{i,j-1/2,k}$, η υδραυλική αγωγιμότητα κατά τη διεύθυνση των γραμμών, στην κοινή πλευρά των στοιχείων (i,j,k) και $(i,j-1,k)$ [LT^{-1}]
- $\Delta c_i \Delta v_k$, το εμβαδό της πλευράς του στοιχείου που είναι κάθετη στη διεύθυνση των γραμμών [L^2]
- $\Delta r_{j-1/2}$, η οριζόντια απόσταση ανάμεσα στα κέντρα των στοιχείων (i,j,k) και $(i,j-1,k)$ [L]



Σχήμα 6. 5. Ροή από το κελί (i,j,k) στο (i,j-1,k) κατά τη διεύθυνση των γραμμών (Ψιλοβίκος, 1999).

Παρόμοιες εκφράσεις μπορούν να γραφούν προσομοιώνοντας τις ροές προς το κελί (i,j,k) για τις υπόλοιπες 5 επιφάνειες, ως εξής :

2) Ροή από το κελί (i,j+1,k), στο (i,j,k) κατά τη διεύθυνση γραμμών :

$$q_{i,j+1/2,k} = KR_{i,j+1/2,k} \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \cdot \frac{(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j+1/2}} \quad (6.37)$$

3) Ροή από το κελί (i-1,j,k), στο (i,j,k) κατά τη διεύθυνση στηλών :

$$q_{i-1/2,j,k} = KC_{i-1/2,j,k} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta v_k \cdot \frac{(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{j-1/2}} \quad (6.38)$$

4) Ροή από το κελί (i+1,j,k), στο (i,j,k) κατά τη διεύθυνση στηλών :

$$q_{i+1/2,j,k} = KC_{i+1/2,j,k} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta v_k \cdot \frac{(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{j+1/2}} \quad (6.39)$$

5) Ροή από το κελί (i,j,k-1), στο (i,j,k) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση :

$$q_{i,j,k-1/2} = KV_{i,j,k-1/2} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \frac{(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k-1/2}} \quad (6.40)$$

6) Ροή από το κελί (i,j,k+1), στο (i,j,k) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση :

$$q_{i,j,k+1/2} = KV_{i,j,k+1/2} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \frac{(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k+1/2}} \quad (6.41)$$

όπου οι παράγοντες των παραπάνω γινομένων δικαιολογούνται ανάλογα με την εξίσωση 6.36. Οι διαστάσεις των στοιχείων (Δr , Δc και Δv) και η υδραυλική αγωγιμότητα K μπορούν να εκφραστούν με μία σταθερή ποσότητα αγωγιμότητας, με διαστάσεις μεταφορικότητας (transmissivity) [L^2T^{-1}], ως εξής :

$$\left. \begin{aligned} CR_{i,j-1/2,k} &= KR_{i,j-1/2,k} \cdot \frac{\Delta c_i \cdot \Delta v_k}{\Delta r_{j-1/2}} \\ CR_{i,j+1/2,k} &= KR_{i,j+1/2,k} \cdot \frac{\Delta c_i \cdot \Delta v_k}{\Delta r_{j+1/2}} \\ CC_{i-1/2,j,k} &= KC_{i-1/2,j,k} \cdot \frac{\Delta r_j \cdot \Delta v_k}{\Delta c_{i-1/2}} \\ CC_{i+1/2,j,k} &= KC_{i+1/2,j,k} \cdot \frac{\Delta r_j \cdot \Delta v_k}{\Delta c_{i+1/2}} \\ CV_{i,j,k-1/2} &= KV_{i,j,k-1/2} \cdot \frac{\Delta r_j \cdot \Delta c_i}{\Delta v_{k-1/2}} \\ CV_{i,j,k+1/2} &= KV_{i,j,k+1/2} \cdot \frac{\Delta r_j \cdot \Delta c_i}{\Delta v_{k+1/2}} \end{aligned} \right\} \quad (6.42)$$

Οι εξισώσεις 6.37-6.41 μετατρέπονταμε τη βοήθεια της εξίσωσης 6.42 ι σε μια λιγότερο πολύπλοκη μορφή:

$$\left. \begin{aligned} q_{i,j-1/2,k} &= CR_{i,j-1/2,k} \cdot (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \\ q_{i,j+1/2,k} &= CR_{i,j+1/2,k} \cdot (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \\ q_{i-1/2,j,k} &= CC_{i-1/2,j,k} \cdot (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \\ q_{i+1/2,j,k} &= CC_{i+1/2,j,k} \cdot (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \\ q_{i,j,k-1/2} &= CV_{i,j,k-1/2} \cdot (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) \\ q_{i,j,k+1/2} &= CV_{i,j,k+1/2} \cdot (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \end{aligned} \right\} \quad (6.43)$$

Οι εξισώσεις 6.43 ισχύουν μόνο για εσωτερικές ροές από τα έξι στοιχεία προς το στοιχείο (i,j,k). Για την περίπτωση κατά την οποία συμβαίνουν εισροές ή εκροές από εξωτερικές πηγές όπως ποτάμια, λίμνες, πηγάδια, εξατμισοδιαπνοή και άλλα, οι ροές αυτές αντιπροσωπεύονται από την έκφραση :

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} \quad (6.44)$$

όπου :

- $a_{i,j,k,n}$ αντιπροσωπεύει τη ροή από τη n-οστή εξωτερική πηγή στο κελί (i,j,k) σε [L^3T^{-1}]

- $p_{i,j,k,n}$, σταθερή ποσότητα σε μονάδες $[L^2T^{-1}]$
- $q_{i,j,k,n}$, σταθερή ποσότητα σε μονάδες $[L^3T^{-1}]$

Για το σύνολο των πραγματοποιούμενων εξωτερικών εισροών ή εκροών από N εξωτερικές πηγές προς το κελί (i,j,k) , μπορεί να γραφτεί :

$$\sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} \cdot h_{i,j,k} + \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} \quad (6.45)$$

όπου καθένας από τους όρους της εξίσωσης 6.45, είναι ίσος με :

$$\left. \begin{aligned} \sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} &= QS_{i,j,k} \\ \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} &= P_{i,j,k} \\ \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} &= Q_{i,j,k} \end{aligned} \right\} \quad (6.46)$$

άρα για το σύνολο των εξωτερικών ροών θα ισχύει :

$$QS_{i,j,k} = P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \quad (6.47)$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση συνέχειας 6.35 για το στοιχείο (i,j,k) και λαμβάνοντας υπ' όψη τις ροές από τα έξι γειτονικά του στοιχεία των εξισώσεων 6.43 καθώς και το σύνολο των εξωτερικών ροών της εξίσωσης 6.47 προκύπτει :

$$q_{i,j-1/2,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i,j,k-1/2} + q_{i,j,k+1/2} + QS_{i,j,k} =$$

$$SS_{i,j,k} \cdot \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \quad (6.48)$$

όπου :

- $\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$, η προσέγγιση της παραγώγου του φορτίου ως προς το χρόνο $[LT^{-1}]$
- $SS_{i,j,k}$, η ειδική αποθηκευτικότητα του στοιχείου (i,j,k) $[L^{-1}]$
- $\Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k$, ο όγκος του στοιχείου (i,j,k) $[L^3]$

Αν αντικατασταθούν οι εξισώσεις 6.43 και 6.47 στην εξίσωση 6.48 τότε η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών γράφεται :

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} \cdot (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+1/2,k} \cdot (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\ & + CC_{i-1/2,j,k} \cdot (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\ & + CC_{i+1/2,j,k} \cdot (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-1/2} \cdot (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ & CV_{i,j,k+1/2} \cdot (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) \end{aligned}$$

$$+ P_{i,j,k} \cdot h^m_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \cdot \left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right)^m \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \quad (6.49)$$

όπου:

- m, το χρονικό βήμα

Αν αντικατασταθεί η προσέγγιση της παραγώγου του φορτίου με διαφορές ανάμεσα σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή t^m όπου το φορτίο είναι άγνωστο και ίσο με $h^m_{i,j,k}$ και σε μία χρονική στιγμή αμέσως προηγούμενη, την t^{m-1} όπου το φορτίο είναι γνωστό και ίσο με $h^{m-1}_{i,j,k}$, θα προκύψει ένα σχήμα πίσω διαφορών ή πεπλεγμένο υπολογιστικό σχήμα :

$$\left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right)^m = \frac{h^m_{i,j,k} - h^{m-1}_{i,j,k}}{t^m - t^{m-1}} \quad (6.50)$$

Άλλο σχήμα που μπορεί εναλλακτικά να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά, είναι το σχήμα των εμπρός διαφορών (forward differences) ή ρητό υπολογιστικό σχήμα :

$$\left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right)^m = \frac{h^{m+1}_{i,j,k} - h^m_{i,j,k}}{t^{m+1} - t^m} \quad (6.51)$$

Στο σχήμα αυτό το φορτίο σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή t^{m+1} είναι άγνωστο και ίσο με $h^{m+1}_{i,j,k}$, ενώ σε μια αμέσως προηγούμενη χρονική στιγμή, την t^m , είναι γνωστό και ίσο με $h^m_{i,j,k}$. Το ρητό υπολογιστικό σχήμα είναι απλούστερο στην επίλυση, γιατί σε κάθε εξίσωση υπάρχει μόνο ένας άγνωστος και μπορεί να λυθεί απευθείας, δίνει όμως αστάθεια στις λύσεις με αποτέλεσμα η αριθμητική λύση να αποκλίνει τελείως από την αναλυτική. Αντίθετα, το πεπλεγμένο υπολογιστικό σχήμα, είναι μεν πιο πολύπλοκο, αφού κάθε εξίσωση έχει 7 αγνώστους και η λύση απαιτεί την ταυτόχρονη επίλυση ενός συστήματος εξισώσεων, αλλά δίνει ευσταθείς αριθμητικές λύσεις, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να συγκλίνουν.

Το πεπλεγμένο υπολογιστικό σχήμα ή πίσω διαφορών είναι ευσταθές άνευ όρων, όπως αποδεικνύεται παρακάτω στην ανάλυση ευστάθειας και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται στο μοντέλο MODFLOW. Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση 6.50, η εξίσωση 6.49 γράφεται :

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} \cdot (h^m_{i,j-1,k} - h^m_{i,j,k}) + CR_{i,j+1/2,k} \cdot (h^m_{i,j+1,k} - h^m_{i,j,k}) \\ & + CC_{i-1/2,j,k} \cdot (h^m_{i-1,j,k} - h^m_{i,j,k}) \\ & + CC_{i+1/2,j,k} \cdot (h^m_{i+1,j,k} - h^m_{i,j,k}) + CV_{i,j,k-1/2} \cdot (h^m_{i,j,k-1} - h^m_{i,j,k}) + \\ & CV_{i,j,k+1/2} \cdot (h^m_{i,j,k+1} - h^m_{i,j,k}) \\ & + P_{i,j,k} \cdot h^m_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \cdot \frac{h^m_{i,j,k} - h^{m-1}_{i,j,k}}{t^m - t^{m-1}} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \end{aligned} \quad (6.52)$$

Η εξίσωση των πεπερασμένων διαφορών 6.52 αποτελεί μία προσομοίωση της διαφορικής εξίσωσης κίνησης του υπόγειου νερού στις τρεις διαστάσεις με μερικές παραγώγους. Όλοι οι συντελεστές είναι γνωστοί, καθώς επίσης και το φορτίο στην χρονική στιγμή m-1. Άγνωστοι είναι τα φορτία στο κελί (i,j,k) και στα 6 γειτονικά του τη χρονική στιγμή m, δηλαδή 7 άγνωστοι που πρέπει να βρεθούν στην χρονική στιγμή m. Αν το i παίρνει τιμές από 1 ως NROW, το j από 1 ως NCOL και το k από 1 ως NLAY, θα έχουμε ένα σύστημα εξισώσεων (NROW-2) (NCOL -2) (NLAY-2) με αγνώστους (NROW NCOL NLAY). Άρα χρειάζονται 6 επιπλέον εξισώσεις οι οποίες προκύπτουν από τις οριακές συνθήκες του προβλήματος. Επίσης χρειάζεται και μία αρχική συνθήκη που θα δίνει τα φορτία h στην χρονική στιγμή m=1. Επομένως η εξίσωση 6.52 γράφεται για κάθε ένα από τα στοιχεία του πλέγματος και σε συνδυασμό με την αρχική συνθήκη πιεζομετρίας και τις 6 οριακές συνθήκες ροής (σταθερό φορτίο, αδιαπέρατο όριο, σταθερή ροή) στα όρια του υδροφορέα, προκύπτει τελικά ένα σύστημα n- αλγεβρικών εξισώσεων με n- αγνώστους. Αν στην παραπάνω σχέση χωρισθούν οι γνωστοί από τους αγνώστους για το συγκεκριμένο στοιχείο (i,j,k) προκύπτει :

$$\begin{aligned}
 & CR_{i,j-1/2,k} \cdot (h^m_{i,j-1,k}) + CR_{i,j+1/2,k} \cdot (h^m_{i,j+1,k}) + CC_{i-1/2,j,k} \cdot (h^m_{i-1,j,k}) \\
 & + CC_{i+1/2,j,k} \cdot (h^m_{i+1,j,k}) + CV_{i,j,k-1/2} \cdot (h^m_{i,j,k-1}) + CV_{i,j,k+1/2} \cdot (h^m_{i,j,k+1}) \\
 & - (CR_{i,j-1/2,k} + CR_{i,j+1/2,k} + CC_{i-1/2,j,k} \\
 & + CC_{i+1/2,j,k} + CV_{i,j,k-1/2} + CV_{i,j,k+1/2} + HCOF_{i,j,k}) h^m_{i,j,k} = RHS_{i,j,k}
 \end{aligned} \quad (6.53)$$

όπου:

- $HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - \frac{SCI}{t^m - t^{m-1}}$, σε $[L^2 T^{-1}]$
- $RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} + SCI_{i,j,k} \cdot \frac{h^{m-1}_{i,j,k}}{t^m - t^{m-1}}$, σε $[L^3 T^{-1}]$
- $SCI_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k$, σε $[L^2]$

η οποία γράφεται με τη μορφή μητρώων, για n-αριθμό στοιχείων (i,j,k) ως εξής :

$$[A] [h] = [q] \quad (6.54)$$

όπου:

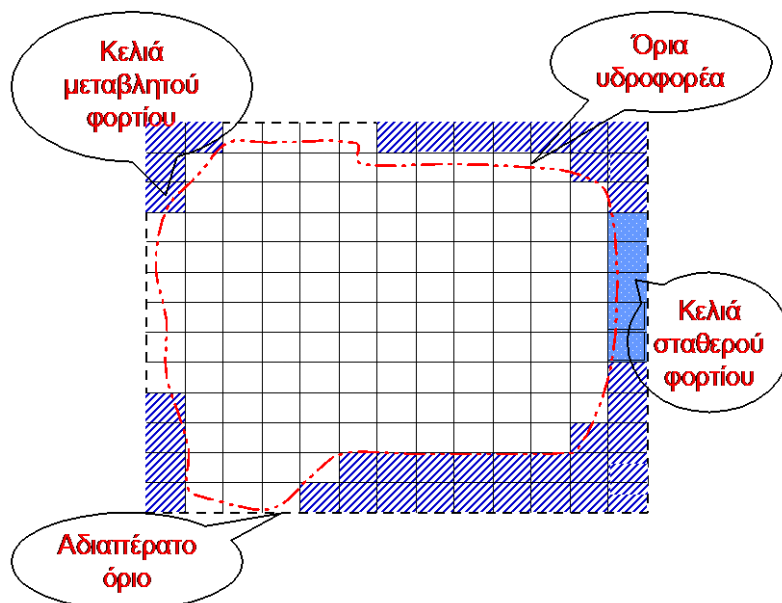
- [A] το μητρώο των σταθερών συντελεστών των φορτίων
- [h] ο πίνακας - διάνυσμα των αγνώστων τιμών των φορτίων στο χρονικό βήμα m
- [q] ο πίνακας - διάνυσμα των σταθερών όρων και φορτίων που αντιστοιχούν στη χρονική στιγμή m-1 και περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία του πλέγματος.

6.4.4. Καθορισμός οριακών συνθηκών

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης των οριακών συνθηκών του εκάστοτε προβλήματος, τα κελιά που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτόν κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Κελιά σταθερού φορτίου, όπου το υδραυλικό φορτίο καθορίζεται εκ των προτέρων και παραμένει σταθερό σε όλα τα βήματα της προσομοίωσης.
- Ανενεργά ή αδιαπέρατα κελιά, στα οποία η ροή δεν επιτρέπεται από ή προς αυτά καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.
- Κελιά μεταβλητού φορτίου. Είναι όλα τα υπόλοιπα, στα οποία τα φορτία δεν καθορίζονται, αλλά μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Οι οριακές συνθήκες ενός προβλήματος προσεγγίζονται μόνο από κελιά σταθερού φορτίου και από ανενεργά ή αδιαπέραστα. Τα πρώτα μπορεί να προσομοιώνουν την επικοινωνία του υδροφορέα με επιφανειακούς πόρους (όπως λίμνες ή ποτάμια), ενώ τα δεύτερα τα έξω όρια του υδροφορέα ή τα αδιαπέραστα όριά του. Όπου υπάρχουν όρια σταθερής εισροής ή μεταβαλλόμενης με το φορτίο μπορούν να προσομοιωθούν ως εξωτερικές πηγές ή ως συνδυασμός αδιαπέραστων κελιών και εξωτερικής πηγής. Στο αμέσως επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η διακριτοποίηση ενός υποθετικού υδροφορέα με τις οριακές του συνθήκες.



Σχήμα 6. 6. Τύποι κελιών και προσομοίωση οριακών συνθηκών

6.4.5. Σχεδιασμός καννάβου

Χρησιμοποιούνται γραμμές καννάβου για να χωριστεί η περιοχή μελέτης σε κελιά, τα οποία είναι ορθογώνια κατά τις δύο διαστάσεις τους, αλλά η καθ' ύψος διάσταση μπορεί να ακολουθήσει τη γεωλογική δομή. Τα κελιά του καννάβου δεν χρειάζεται να είναι όλα του ίδιου μεγέθους, παρόλα αυτά καμιά σειρά ή στήλη δεν πρέπει να είναι

κατά 50% μεγαλύτερη από γειτονική της. Η διαφορά στο μέγεθος επιβαρύνει το σφάλμα του μοντέλου και εάν η διαφορά στα μεγέθη εφαπτόμενων σειρών ή στηλών είναι πολύ μεγάλη, τα προκύπτοντα σφάλματα μπορεί να είναι σημαντικά. Επειδή η επίλυση της προσομοίωσης του μοντέλου μπορεί να πάρει αρκετό χρόνο, είναι χρήσιμο να χρησιμοποιούνται μικρά κελιά μόνο σε εκείνα τα τμήματα του μοντέλου, στα οποία απαιτούνται λεπτομερή αποτελέσματα ή όπου οι κλίσεις είναι μάλλον απότομες. Πιο απότομες κλίσεις βρίσκονται κοντά στα πηγάδια άντλησης και σε άλλα σημεία απορροής. Αν ο υδροφορέας προς προσομοίωση είναι ανισότροπος, ο κάνναβος πρέπει να ευθυγραμμιστεί με τις διευθύνσεις της μεγαλύτερης και της μικρότερης υδραυλικής αγωγιμότητας. Διαφορετικά, ο κάνναβος θα πρέπει να ευθυγραμμιστεί με όποιον τρόπο είναι πιο βολικός. Υπάρχει η δυνατότητα κάποια κελιά του καννάβου να καθοριστούν ως ανενεργά, με αποτέλεσμα να εξαιρούνται από το μοντέλο. Τα όρια του συστήματος ροής πρέπει να προσεγγιστούν από ένα κλειστό όριο. Εάν η επαναφόρτιση δεν είναι ομοιόμορφη, η περιοχή που εκτείνεται γύρω από κάθε ζώνη διαφορετικής επαναφόρτισης πρέπει να είναι κοντά στα πραγματικά της όρια, έτσι ώστε η ποσότητά της να είναι προσεγγιστικά σωστή.

6.4.6. Τρόποι προσέγγισης του MODFLOW

Τα μοντέλα προσομοίωσης του MODFLOW μπορούν να κατασκευαστούν με δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις:

- Την προσέγγιση του καννάβου (Grid Approach): Αυτή συνεπάγεται την απευθείας εργασία πάνω στον τρισδιάστατο κάνναβο και την εφαρμογή των οριακών συνθηκών, καθώς και την εισαγωγή όλων των υπολοίπων παραμέτρων του μοντέλου από κελί σε κελί.
- Την προσέγγιση του εννοιολογικού μοντέλου (Conceptual Model Approach): Εδώ η εργασία προϋποθέτει τη χρήση εργαλείων προερχόμενων από τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, πάνω σε ψηφιοποιημένο χάρτη της περιοχής που πρόκειται να προσομοιωθεί. Τα δεδομένα του εννοιολογικού μοντέλου εν συνεχεία αντιγράφονται στον κάνναβο.

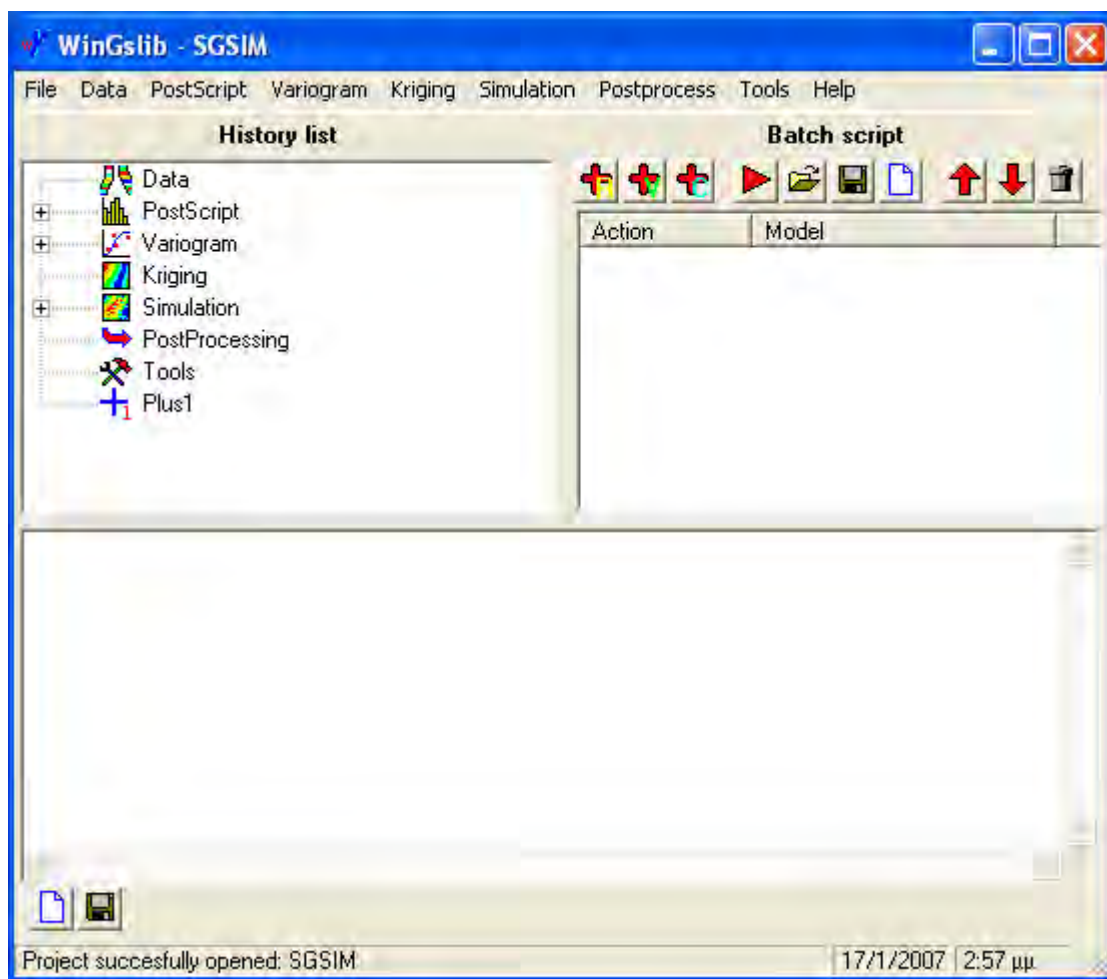
Σημειώνεται ότι σε περιπτώσεις προσομοίωσης μεγάλων πραγματικών υδροφορέων η προσέγγιση του εννοιολογικού μοντέλου είναι αποτελεσματικότερη, πιο εύχρηστη και λιγότερη χρονοβόρα σε σχέση με την προσέγγιση του καννάβου. Εντούτοις, η πρώτη είναι χρήσιμη σε απλά προβλήματα ή σε ακαδημαϊκές ασκήσεις, όπου η εισαγωγή στοιχείων κελί προς κελί θεωρείται απαραίτητη. Στην εν λόγω έρευνα προτιμήθηκε η εννοιολογική προσέγγιση μιας και η έκταση του πεδίου μελέτης είναι 500 Km², το οποίο συνεπάγεται έναν πολύ μεγάλο αριθμό κελιών.

6.5. Μοντέλο γεωστατιστικής προσέγγισης

Πρόκειται για τη Γεωστατιστική Βιβλιοθήκη (GSLIB). Αυτό το όνομα χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή γεωστατιστικών προγραμμάτων, τα οποία είναι γραμμένα σε Fortran και αναπτύχθηκαν στο Πανεπιστήμιο του Stanford (Deutsch και

Journal, 1997). Το πρόγραμμα το οποίο συνεργάζεται με το λειτουργικό σύστημα των Windows καλείται WinGslib. Μια πρώτη γνωριμία με το περιβάλλον του WinGslib φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Είναι το κύριο μενού που εμφανίζεται με την εκτέλεση του προγράμματος. Έχοντας ως οδηγό το κεντρικό menu της παρακάτω εικόνας θα γίνει η παρουσίαση των λειτουργιών του προγράμματος. Αυτές είναι οι εξής έξι:

1. Data (manipulation)
2. Postscript (plots)
3. Variograms
4. Kriging
5. Simulation
6. Postprocess



Σχήμα 6. 7. Κεντρικό menu του WinGslib

Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι καθόλου τυχαία η σειρά των λειτουργιών έτσι όπως εμφανίζονται στο menu του προγράμματος αφού πίσω από αυτές τις λειτουργίες βρίσκονται τα απαραίτητα εργαλεία για τη γεωστατιστική προσέγγιση, τα οποία πρέπει να εκτελεστούν με την παραπάνω σειρά. Δηλαδή, εντελώς χονδρικά και πριν

αρχίσει η εκτενής παρουσίαση των εργαλείων, το Wingslib καθοδηγεί τον χρήστη στη γεωστατιστική προσέγγιση του προβλήματος με τα ακόλουθα βήματα :

- Αρχικά, στο πρώτο βήμα γίνεται η τροποποίηση / μετατροπή των δεδομένων αν αυτό απαιτείται. Σε κάποιες περιπτώσεις όταν αυτό δεν είναι αναγκαίο το πρώτο βήμα μπορεί να παραληφθεί.
- Στο δεύτερο βήμα δημιουργούνται όλα τα απαραίτητα στατιστικά γραφήματα τα οποία θα βοηθήσουν σε μια πρώτη εξαγωγή συμπερασμάτων για τη στατιστική συμπεριφορά των δεδομένων και τα οποία θα χρειαστούν στα παρακάτω βήματα.
- Στο τρίτο βήμα γίνεται η κατασκευή τόσο του πειραματικού μεταβλητογράμματος όσο και του μοντέλου του.
- Στο τέταρτο βήμα ξεκινά η χωρική παρεμβολή της υπό μελέτης μεταβλητής με τη μέθοδο Kriging που χρησιμοποιεί αποκλειστικά το Wingslib.
- Στο πέμπτο βήμα κρύβεται και η μεγάλη επιτυχία του GSLIB, αφού επιτυγχάνεται εδώ η παραγωγή πολλαπλών απεικονίσεων/χαρτών του πεδίου με την υπό μελέτη μεταβλητή μέσω μια σειράς στοχαστικών αλγορίθμων.
- Στο έκτο βήμα πραγματοποιείται η περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων, στην περίπτωση που αυτά θα αποτελέσουν δεδομένα εισόδου για μια άλλη προσομοίωση.

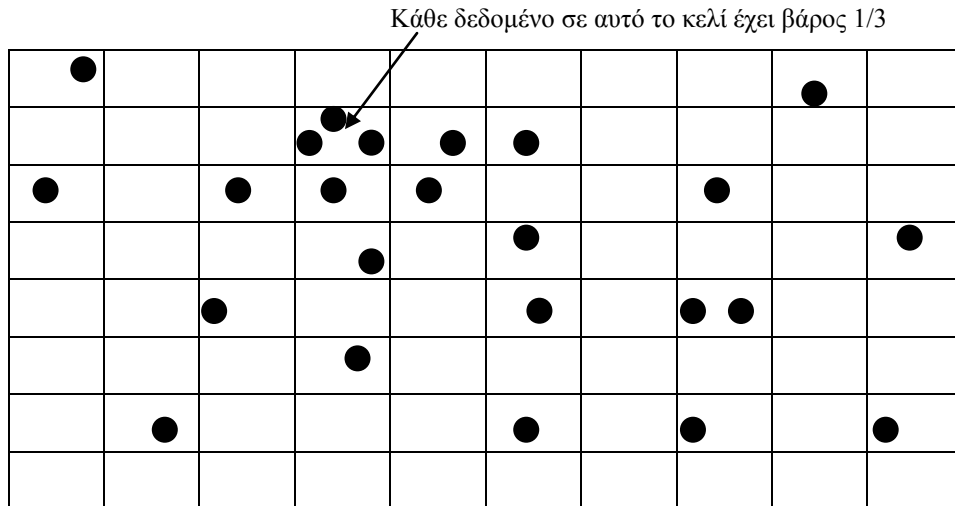
6.5.1. Data

Σε αυτό το μενού συναντώνται τα παρακάτω προγράμματα :

Σύστημα αλλαγής συντεταγμένων (Change Coordinates System ή rotcoord) το οποίο επιτυγχάνει τη μετάθεση και περιστροφή των δεδομένων από ένα σύστημα συντεταγμένων XY σε ένα άλλο X'Y'. Αυτό χρειάζεται σε περιπτώσεις που οι άξονες των συντεταγμένων πρέπει να συμπίπτουν με κάποιο άξονα συγκεκριμένου ενδιαφέροντος.

Αποδέσμευση κελιών (Cell decluster ή declus): Στην πραγματικότητα τα αρχικά δεδομένα εμφανίζονται αρκετά συχνά σε συστοιχίες. Είναι δηλαδή συγκεντρωμένα σε μία περιοχή του υπό μελέτη πεδίου. Αν όχι όλα, ένα μεγάλο ποσοστό αυτών. Όμως για την σωστή στατιστική ανάλυσή τους που θα οδηγήσει και σε σωστή προσομοίωση απαιτείται ένα ιστόγραμμα, το οποίο να είναι αντιπροσωπευτικό όλου του υπό μελέτη πεδίου. Για να προκύψει μια αντιπροσωπευτική κατανομή, ένας τρόπος είναι να προσδιοριστούν βάρη αποδέσμευσης για κάθε κελί, όπου η τιμή αυτών να είναι μικρή εκεί που υπάρχουν πολλά δεδομένα και μεγάλη στην αντίθετη περίπτωση. Όταν η τιμή ενός αποδεσμευμένου βάρους είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα, τότε το δείγμα είναι υπέρβαρο και το αντίθετο όταν είναι μικρότερο της μονάδας. Τα βάρη αυτά μετά θα χρησιμοποιηθούν ως συχνότητες εμφάνισης για να προκύψει το ιστόγραμμα ή η *cdf*. Η βασική ιδέα είναι να χωριστεί το υπό μελέτη πεδίο σε L υποπεδία, που περιέχουν τους

δεσμούς των δεδομένων και να εφαρμοστεί ίση κατανομή βαρύτητας σε κάθε πεδίο, η οποία να ακολουθείται από τους μέσους όρους των στατιστικών μέσων των κελιών. Η μέθοδος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα για ένα 2D πρόβλημα.



Σχήμα 6. 8. Ένα 2D παράδειγμα της μεθόδου αποδέσμευσης

Πρώτα, δημιουργείται ένα τυπικός κάνναβος. Το βάρος που αντιστοιχεί σε κάθε δεδομένο είναι αντιστρόφως ανάλογο του αριθμού των δεδομένων που υπάρχουν στο κελί. Κάθε δεδομένο που υπάρχει σε ένα κελί a_i δέχεται βάρος $1/n_i$, όπου a_i είναι το εμβαδόν (σε 3D θα είναι ο όγκος) του κελιού i και n_i είναι ο αριθμός των δεδομένων που υπάρχουν σε αυτό το κελί. Τα κελιά, τα οποία δεν έχουν δεδομένα, δεν λαμβάνονται υπόψη στη διαδικασία.

Κανονικός μετασχηματισμός (Normal Score Transform ή *nscore*): Η Ακολουθιακή Προσομοίωση Gauss (**S**equential **G**aussian **S**imulation) δουλεύει με τις κανονικές (*normal score*) τιμές των αρχικών δεδομένων. Η προσομοίωση πραγματοποιείται στον κανονικό (*normal*) χώρο και μετά οι προσομοιωμένες τιμές μετασχηματίζονται προς τα πίσω για να επιστρέψουν στον πραγματικό χώρο.

Ας θεωρήσουμε τα αρχικά δεδομένα z_i , $i = 1, \dots, n$, το καθένα με μία συγκεκριμένη πιθανότητα p_i , $i = 1, \dots, n$ (με $\sum_{i=1}^n p_i = 1$). Εάν η διαδικασία της αποδέσμευσης βαρών δε

θεωρηθεί σημαντική, τότε όλες οι πιθανότητες p_i θα είναι ίσες με $1/n$. Τα δεσμευμένα δεδομένα z_i κατατάσσονται τυχαία. Όταν υπάρχει μία μεγάλη συστοιχία από αυτά σε έναν δεσμό, τότε πρέπει να καταταχθούν σύμφωνα με τον *nscore* μετασχηματισμό. Αυτό μπορεί να γίνει με μια διαδικασία που στηρίζεται στη φύση των δεδομένων ή με τη διάσπαση των δεσμών σύμφωνα με τους γειτονικούς μέσους όρους των δεδομένων. Εξαιτίας των περιορισμένων δεδομένων που υπάρχουν στα περισσότερα προβλήματα, κάποιος θα έπρεπε να θεωρήσει μία μη μηδενική πιθανότητα για τιμές μικρότερες της ελάχιστης τιμής των δεδομένων, ή μεγαλύτερες από τη μέγιστη τιμή αυτών. Επιπλέον κάποιες υποθέσεις πρέπει να γίνουν για τα άκρα των κατανομών των πιθανοτήτων, οι οποίες πρέπει να εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του κάθε προβλήματος. Μία κοινή

λύση είναι όλες οι προηγούμενες πιθανότητες p_i να έχουν άθροισμα πολύ μικρότερο της μονάδας, π.χ $n/n+1$ εάν υπάρχουν n δεδομένα. Αυτή η λύση είναι ευαίσθητη στον αριθμό των δεδομένων και δεν προσφέρει ευελιξία στη μοντελοποίηση των άκρων.

Για την αποφυγή αυτού του ελαττώματος, η αθροιστική πιθανότητα *cdf* του κάθε δεδομένου αναθεωρείται και είναι ίση με τον μέσο όρο της αρχικής τιμής της και του επόμενου μικρότερου δεδομένου. Αυτό επιτρέπει πεπερασμένες πιθανότητες να είναι μικρότερες από τη μικρότερη τιμή των δεδομένων και μεγαλύτερες από τη μέγιστη τιμή αυτών.

Έστω c_i είναι η αθροιστική πιθανότητα του i -οστού μεγαλύτερου δεδομένου z_i ($c_i = \sum_{j=1}^i p_j$). Ο normal score μετασχηματισμός y_i του δεδομένου z_i ισούται με :

$$y_i = G^{-1}\left(\frac{c_i + c_{i-1}}{2}\right) \quad (6.55)$$

με $G(y)$ να είναι η τυπικά κανονική *cdf*, $y_c = G^{-1}(c)$ να είναι η ανταποκρινόμενη τυπικά κανονική c ποσότητα και $c_0 = 0$. Τα περιορισμένα δεδομένα μπορεί να δώσουν μια *cdf* που να είναι ασυνεχής και όχι αντιπροσωπευτική όλου του πληθυσμού. Για αυτόν τον λόγο το ιστόγραμμα των δεδομένων μπορεί να εξομαλυνθεί με το πρόγραμμα *histsmth*. Έτσι το προκύπτων ιστόγραμμα είναι έτοιμο να χρησιμοποιηθεί στον *normal score* μετασχηματισμό (και η παράμετρος *ismooth* = 1 σε αυτήν την περίπτωση).

Εάν η z_i είναι η i - οστή τιμή από ένα σύνολο L δειγμάτων που βρίσκονται στην k - οστή τάξη (z_{k-1}, z_k) του εξομαλυνμένου ιστογράμματος, τότε η αθροιστική πιθανότητα είναι :

$$c_i = \sum_{j=1}^{k-1} p_j + \frac{1}{L} p_k \quad (6.56)$$

με το p_k να είναι η εξομαλυνμένη πιθανότητα της τάξης (z_{k-1}, z_k). Ο *normal score* μετασχηματισμός y_i του δεδομένου z_i ισούται με :

$$y_i = G^{-1}(c_i), \quad i=1, \dots, n \quad (6.57)$$

Οι τιμές p_k θα είναι ήδη αποδεσμευμένες, εάν στην εξομάλυνση του ιστογράμματος λήφθηκαν υπόψη τα βάρη αποδέσμευσης. Εάν πάντως τα δεδομένα εισόδου έχουν υποστεί εξομάλυνση τότε ο *normal score* μετασχηματισμός θα δώσει καλύτερα και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Προς τα πίσω κανονικός μετασχηματισμός (Normal Score Back Transformation ή *backtr*): Ο προς τα πίσω μετασχηματισμός (*back transform*) z_i της τυπικά κανονικής μεταβλητής y_i δίνεται από: $z_i = F^{-1}(G(y_i))$, όπου $F(z)$ είναι η (αποδεσμευμένη) *cdf* των αρχικών δεδομένων, εξομαλυνμένη ή μη. Σχεδόν πάντα, η τιμή $G(y_i)$ δεν θα ανταποκρίνεται ακριβώς σε μια αρχική *cdf* τιμή F . Επιπλέον θα απαιτείται κάποια παρεμβολή μεταξύ των αρχικών τιμών z_i ή παρέκταση ανάμεσα στην ελάχιστη και μέγιστη τιμή των z_i . Εκτελείται πάντα γραμμική παρεμβολή ανάμεσα σε δύο γνωστές τιμές. Μια ποικιλία επιλογών είναι διαθέσιμη για τη μεταχείριση των άκρων των

κατανομών. Αυτός ο προς τα πίσω μετασχηματισμός βοηθά στην ακριβή αναπαραγωγή της αρχικής *cdf* $F(z)$, εκτός των δύο ακραίων τιμών. Πρέπει να επισημανθεί κι εδώ ότι είναι προτιμητέα τα εξομαλυσμένα ιστογράμματα. Ο προς τα πίσω μετασχηματισμός πραγματοποιείται αυτόματα στο πρόγραμμα *sgsim*, αλλά υπάρχουν περιπτώσεις που πρέπει να εκτελεστεί ξεχωριστά.

Γενικός μετασχηματισμός (General Transformation ή trans) λαμβάνει τα δεδομένα που έχει μια οποιαδήποτε κατανομή και τα μετατρέπει σε άλλα της αρεσκείας μας. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διόρθωση των αποτελεσμάτων μιας προσομοίωσης ή για ανάλυση ευαισθησίας.

6.5.2. Postscript

Συναντώνται τα ακόλουθα προγράμματα:

Histogram ή histpl, στο οποίο παρουσιάζεται το ιστόγραμμα των τιμών των δεδομένων μαζί με ένα πίνακα που δείχνει τις στατιστικές παραμέτρους.

Probability Paper ή probplt, που δεν είναι άλλο από τη γραφική παράσταση της αθροιστικής πιθανότητας κάθε δεδομένου σε σχέση με την τιμή του. Ο άξονας της αθροιστικής πιθανότητας είναι τέτοιος ώστε τα σημεία να πέφτουν σε ευθεία γραμμή όταν τα δεδομένα ακολουθούν κανονική κατανομή. Δίνεται και η δυνατότητα της επιλογής της λογαριθμικής αθροιστικής πιθανότητας.

Scattergram ή scatplt, που είναι το διάγραμμα διασποράς δύο διαφορετικών μεταβλητών τόσο σε αριθμητική όσο και σε λογαριθμική κλίμακα.

Q-Q and P-P Plots ή qqplt: Το πρώτο γράφημα συγκρίνει τα ποσοστημόρια των κατανομών δύο διαφορετικών μεταβλητών. Το δεύτερο συγκρίνει τις αθροιστικές πιθανότητές τους.

Location Map ή locmap: είναι το γράφημα των διεσπαρμένων δειγματοληπτικών τιμών μιας μεταβλητής στο XY σύστημα, το οποίο μπορεί να είναι είτε σε έγχρωμο είτε σε ασπρόμαυρο φόντο. Τα σημεία αυτά απεικονίζονται σε κύκλοι και παρουσιάζεται έτσι η πυκνότητα – συγκέντρωση της μεταβλητής.

2-D Map ή pixelplt: η γραφική αναπαράσταση μιας τομής των τιμών του καννάβου μιας μεταβλητής στον 2-D χώρο, με τη διαφορά (σε σχέση με το Locmap) ότι οι τιμές αυτές βρίσκονται σε κάρναβο. Η διαφορά με το Locmap είναι ότι εδώ οι τιμές αυτές είναι το αποτέλεσμα ή της Kriging ή κάποιας μεθόδου προσομοίωσης. Όπως και στο Locmap έτσι κι εδώ η αναπαράσταση μπορεί να είναι είτε σε έγχρωμο είτε σε ασπρόμαυρο φόντο.

Bivariate Probability Density Map ή bivplt: τυπώνει το συνδυασμό των αποτελεσμάτων των *histsmth* και *scatsmth*, αλλά χρησιμοποιείται σπανίως για αυτό και θεωρήθηκε περιττή η παρουσίασή του.

Variogram Plot ή vargplt: τυπώνει το πειραματικό μεταβλητόγραμμα (το οποίο είναι αποτέλεσμα των προγραμμάτων *gam* ή *gamv*) και του μοντέλου μεταβλητογράμματος

(που κατασκευάζεται από το πρόγραμμα vmodel). Η χρησιμότητά του είναι αρκετά μεγάλη μιας και με αυτό το πρόγραμμα γίνεται η μοντελοποίηση του πειραματικού μεταβλητογράμματος.

6.5.3. Variogram

Πριν γίνει η παρουσίαση, πρέπει να γίνει αναφορά στα μοντέλα μεταβλητογράμματος που παρέχει το GSLIB. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2.4.1 χάρη της θεώρησης της στασιμότητας το μοντέλο μεταβλητόγραμμα ή ημιμεταβλητόγραμμα εξαρτάται πλέον μόνο από το διάνυσμα h της απόστασης των σημείων και όχι πλέον από τη θέση τους. Έτσι όλοι οι τύποι των μοντέλων μεταβλητογραμμάτων αποτελούν ουσιαστικά συναρτήσεις του h . Αυτά είναι :

1. Το σφαιρικό (spherical)

$$\gamma(h) = c \cdot Sph\left(\frac{h}{\alpha}\right) = \begin{cases} c \cdot \left[1.5 \cdot \frac{h}{\alpha} - 0.5 \cdot \left(\frac{h}{\alpha}\right)^3\right], & \text{εάν } h \leq \alpha \\ c & , \text{εάν } h \geq \alpha \end{cases} \quad (6.58)$$

2. Το εκθετικό (exponential)

$$\gamma(h) = c \cdot Exp\left(\frac{h}{\alpha}\right) = c \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{3h}{\alpha}\right)\right] \quad (6.59)$$

3. Το κανονικό (Gaussian)

$$\gamma(h) = c \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{(3h)^2}{\alpha^2}\right)\right] \quad (6.60)$$

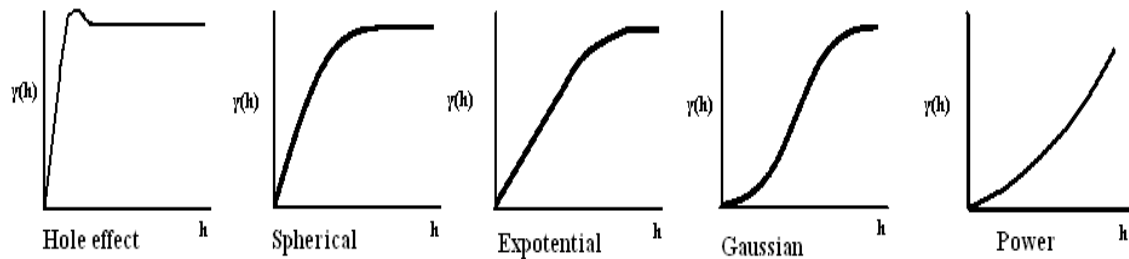
4. Το δυναμικό (power) το οποίο δεν εξαρτάται από το φάσμα α , αλλά από τον εκθέτη $0 < \omega < 2$

$$\gamma(h) = c \cdot h^{\omega} \quad (6.61)$$

5. Το hole effect

$$\gamma(h) = c \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{h}{\alpha} \cdot \pi\right)\right] \quad (6.62)$$

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα γραφήματα των παραπάνω μοντέλων.



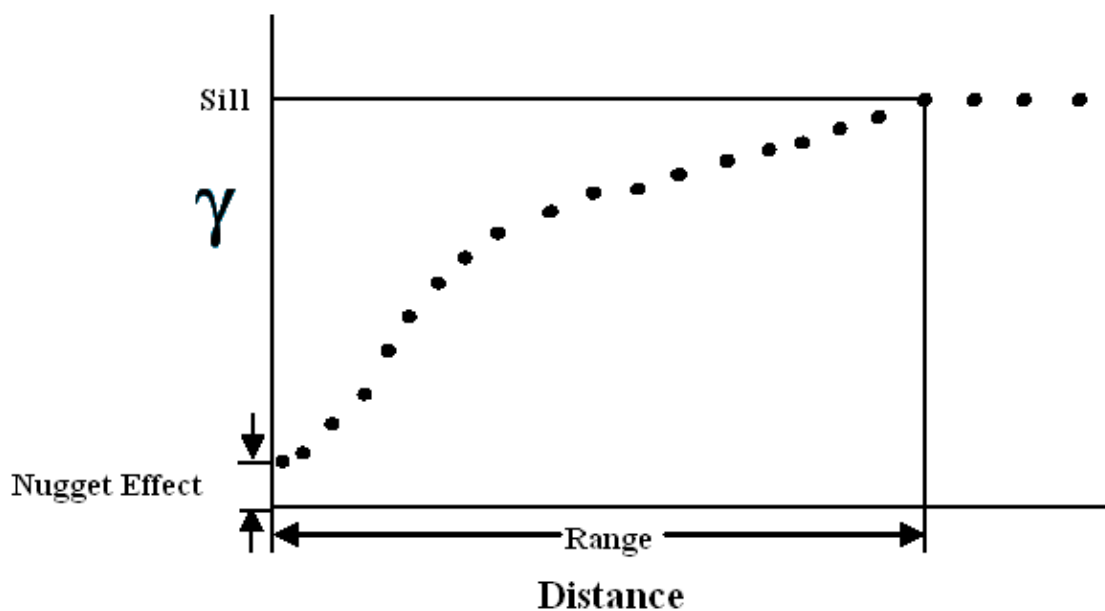
Σχήμα 6. 9. Τα πέντε μοντέλα μεταβλητογράμματος που παρέχει το GSLIB

Τα χαρακτηριστικά για το γράφημα ενός μεταβλητογράμματος (πειραματικού ή μοντέλου) είναι τα ακόλουθα :

- Sill (κατώφλι) c : Είναι η τιμή του μεταβλητογράμματος όταν αυτό πλέον γίνεται παράλληλο με τον άξονα της απόστασης. Είναι πολύ σημαντικό να τονιστεί εδώ ότι για κανονικά μετασχηματισμένες τιμές (όπως αυτές της παρούσας μελέτης) η τιμή αυτή ισούται με τη μονάδα.
- Range (εύρος) a : Είναι η απόσταση για την οποία το μεταβλητόγραμμα φτάνει στο κατώφλι. Καλείται «ακτίνα συσχέτισης», γιατί πέρα από αυτήν τα δεδομένα είναι πλέον ασυσχέτιστα.
- Nugget effect (επίδραση βόλου): Το κατακόρυφο ύψος της ασυνέχειας στην αρχή. Για μηδενική απόσταση (όταν δηλαδή τα δεδομένα βρίσκονται ακριβώς στην ίδια θέση) η τιμή του είναι μηδέν. Σε όλα τα πειραματικά μεταβλητογράμματα δεν είναι ποτέ μηδέν, όσο μικρή και αν είναι αυτή η απόσταση. Η επίδραση βόλου είναι ένας συνδυασμός των μικρής κλίμακας αποκλίσεων (η απόσταση των οποίων είναι μικρότερη από τη μικρότερη απόσταση μεταξύ των δειγμάτων) και των σφαλμάτων που γίνονται κατά τη συλλογή των δειγμάτων.

Από τα τρία αυτά χαρακτηριστικά, το εύρος με την επίδραση βόλου παίζουν τον σημαντικότερο ρόλο στη εξαγωγή συμπερασμάτων για τη χωρική μεταβλητότητα του πεδίου. Φαινόμενα, των οποίων το μεταβλητόγραμμά τους έχει μεγάλο εύρος και μικρή επίδραση βόλου, χαρακτηρίζονται από καλή χωρική συνέχεια. Τέτοια είναι το υδροστατικό ύψος, το τοπογραφικό ύψος ενώ στα φαινόμενα με μικρή χωρική συνέχεια κατατάσσεται η υδραυλική αγωγιμότητα, η μεταφορικότητα και οι συγκεντρώσεις ουσιών.

Τα τρία αυτά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6. 10. Χαρακτηριστικά του γραφήματος ενός μεταβλητογράμματος

Έτσι λοιπόν τα προγράμματα που υποστηρίζει το menu Variogram είναι :

Regular Spaced Data ή gam: Κατασκευάζει το πειραματικό μεταβλητόγραμμα μιας ή περισσότερων μεταβλητών, οι τιμές των οποίων είναι σε κάνναβο. Αυτό εμφανίζεται όταν αυτή η μεταβλητή είναι αποτέλεσμα μιας οποιαδήποτε μεθόδου χωρικής ανακατανομής ή προσομοίωσης. Στην πράξη όμως οι δειγματοληπτικές τιμές μιας μεταβλητής είναι διάσπαρτες μέσα στο πεδίο κι όχι χωροθετημένες σε κάνναβο. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα παραγωγής μεταβλητογραμμάτων σε όσες κατευθύνσεις επιθυμεί ο χρήστης κι αυτό γιατί μόνο έτσι θα ανακαλύψει την κατεύθυνση με τη μικρότερη ανισοτροπία, της οποίας το πειραματικό μεταβλητόγραμμα θα είναι αυτό το οποίο θα μοντελοποιηθεί για την περαιτέρω επεξεργασία.

Irregular Spaced Data ή gamv: Υπολογίζει το μεταβλητόγραμμα μιας ή περισσότερων μεταβλητών οι δειγματοληπτικές τιμές των οποίων είναι διάσπαρτες στο πεδίο μελέτης. Είναι το πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως και έχει τη δυνατότητα να δώσει μεταβλητογράμματα σε διάφορες κατευθύνσεις.

Variogram Map ή varmap: Ο χάρτης που δείχνει τις τιμές του μεταβλητογράμματος σε όλες τις κατευθύνσεις. Το εργαλείο αυτό είναι από τα πιο σημαντικά για το καθορισμό του καταλληλότερου μεταβλητογράμματος αφού από αυτό φαίνεται η κατεύθυνση της μεγαλύτερης συνέχειας, κάτι το οποίο απαιτεί κόπο να γίνει από τα προγράμματα gam ή gamv διότι πρέπει να προκύψουν πολλά μεταβλητογράμματα σε διάφορες κατευθύνσεις για να γίνει η τελική επιλογή. Δυστυχώς το μεγάλο μειονέκτημα του είναι ότι δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε μεγάλου μήκους πεδία, όπως αυτό της παρούσας μελέτης. Για τον λόγο αυτό η παρουσίαση των παραμέτρων του δεν κρίνεται σκόπιμη.

Indicator Variogram Computation: Είναι το πρόγραμμα που υπολογίζει το μεταβλητόγραμμα για διακριτοποιημένες μεταβλητές.

Variogram file from model ή vmodel: υπολογίζει το μεταβλητόγραμμα μοντέλο για ένα πειραματικό μεταβλητόγραμμα το οποίο βρίσκεται στο αρχείο εισόδου. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεταξύ των πέντε μοντέλων που του παρέχει το GSLIB.

6.5.4. Kriging

Υπάρχουν τα ακόλουθα προγράμματα:

2D Kriging ή kb2d, το οποίο είναι ένα μικρό πρόγραμμα για μικρούς 2D καννάβους και χρησιμοποιείται καθαρά για εκπαιδευτικούς λόγους έτσι ώστε ο χρήστης να είναι έτοιμος για το 3D Kriging.

3D Kriging ή kt3d είναι το πρόγραμμα που χρησιμοποιεί το GSLIB για την εφαρμογή της μεθόδου Kriging σε μια συνεχή μεταβλητή σε 3D χώρο. Παρέχει όλες τις παραλλαγές της Kriging, όπως αυτές που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2.4.2.

6.5.5. Simulation

Υπάρχουν οι εξής αλγόριθμοι προσομοίωσης:

Monte Carlo ή draw, που είναι η απλή της μορφή, η οποία δέχεται σαν δεδομένα μόνο τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της μεταβλητής. Δεν προτείνεται από το GSLIB παρά μόνο για εκπαιδευτικούς λόγους.

Gaussian LU ή lusim, η οποία εφαρμόζεται μόνο σε μικρούς καννάβους όχι παραπάνω από 2500 κελιά. Στη παρούσα μελέτη τα κελιά είναι 40000.

Gaussian Truncated ή gtsim, που χρησιμοποιείται για διακριτές μεταβλητές.

Probability Field ή pfsim, το οποίο είναι πρόγραμμα επεξεργασίας αποτελεσμάτων που προέρχονται από εξαρτημένες προσομοιώσεις. Δέχεται δηλαδή σαν αρχείο εισόδου το αποτέλεσμα μιας άλλης προσομοίωσης.

Boolean ή ellipsim, χρησιμοποιείται καθαρά για διακριτές μεταβλητές.

Sequential Indicator Simulation ή sisim, το οποίο χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο της ακολουθιακής προσομοίωσης, αλλά για διακριτές μεταβλητές.

Simulated Annealing ή anneal και sasim, είναι τα δύο προγράμματα προσομοίωσης που στηρίζονται στον αλγόριθμο Anneal. Το anneal ανήκει στην κατηγορία των προγραμμάτων επεξεργασίας «post-process» των αρχείων εξόδου από τις προσομοιώσεις, ενώ στο sasim η παράγωγή των πολλαπλών απεικονίσεων εξαρτάται από τα στατιστικά χαρακτηριστικά των δεδομένων (ιστογράμματα, μεταβλητογράμματα) και όχι από τις τιμές αυτών. Στην προσομοίωση ενδυνάμωσης δημιουργούνται εναλλασσόμενες εξαρτημένες στοχαστικές εικόνες από συνεχείς ή διακριτοποιημένες μεταβλητές με τη βοήθεια αριθμητικών τεχνικών. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα να συνδυάζει την αναπαραγωγή στατιστικών αναλύσεων δύο

σημείων με πολύπλοκα χωρικά στατιστικά πολλών σημείων με τη βοήθεια γεωμετρικών σχημάτων. Η βασική ιδέα της είναι η συνεχής αναστάτωσης μιας αρχικής εικόνας ώσπου να ταιριάζει με κάποια προκαθορισμένα χαρακτηριστικά που έχουν δοθεί σε μια αντικειμενική συνάρτηση. Η αποδοχή κάθε αναστάτωσης εξαρτάται από το πόσο κοντά πλησιάζει η εικόνα τις απαιτήσεις της αντικειμενικής συνάρτησης. Παρόλο που αναπτύχθηκε ως αλγόριθμος βελτιστοποίησης, ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιείται για να παράγει στοχαστικές εικόνες. Στην πραγματικότητα οι βαθμοί ελευθερίας, δηλαδή ο αριθμός των στοιχείων-κόμβων που μπορούν να αναστατωθούν, είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από τους περιορισμούς της αντικειμενικής συνάρτησης. Επίσης, υπάρχει συνήθως ανοχή στο πόσο καλά θα ικανοποιηθεί η αντικειμενική, γεγονός που οδηγεί στην επιλογή των αποδεκτών απεικονίσεων. Το κλειδί για την επιτυχή εκτέλεσή της, είναι η ικανότητα του χρήστη να κρίνει γρήγορα την ποιότητα της εικόνας ανάμεσα σε δύο αναστατώσεις και να αποφασίζει εάν θα κρατήσει την αναστάτωση ή όχι. Οι απεικονίσεις της συνεχούς μεταβλητής μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε από την αναπαραγωγή ενός μοντέλου βαριογράμματος, είτε από μεταβλητογράμματα δεικτών, είτε τέλος από εξαρτημένες κατανομές που προκύπτουν από μια δεύτερη μεταβλητή. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά νέα και οι δημιουργοί του GSLIB είναι επιφυλακτικοί στην εφαρμογή της σε πραγματικά πεδία.

Σκοπίμως αφήσαμε για το τέλος τη SGSIM, μιας και όπως αναφέρθηκε είναι η μέθοδος που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί.

6.5.6. Ακολουθιακή Προσομοίωση (Sequential Simulation)

Σε πάρα πολλές εφαρμογές είναι απαραίτητη η αναπαραγωγή της χωρικής εξάρτησης πολλών μεταβλητών μαζί. Για παράδειγμα, ένα ρεαλιστικό μοντέλο για ένα κοιτάσμα που περιέχει φλέβες χρυσού και χαλκού, πρέπει να λάβει υπόψη, για τη χωρική αλληλεξάρτηση, τόσο τις ποσότητες του χρυσού όσο και του χαλκού. Για τη ρεαλιστική προσομοίωση ενός κοιτάσματος πετρελαίου πρέπει να ληφθούν υπόψη σαν μεταβλητές της προσομοίωσης το πορώδες, η διαπερατότητα, αλλά και ο βαθμός κορεσμού του πετρελαίου. Δημιουργείται λοιπόν ένα αρκετά πολύπλοκο σύστημα εξισώσεων όπως φαίνεται και στην παρακάτω εξίσωση :

$$\Sigma = [C_{k,k'}(h) = \text{Cov}\{Z_k(u), Z_{k'}(u+h)\}, k, k' = 1, \dots, K] \quad (6.63)$$

Η πιο απλή, μα αρκετά αξιόπιστη προσέγγιση για την επίλυση τέτοιων εφαρμογών είναι η ακολουθιακή προσομοίωση. Η πιο σημαντική μεταβλητή ή η μεταβλητή με τα πιο αξιόπιστα δεδομένα, καλείται κύρια μεταβλητή $Z_1(u)$ και είναι αυτή που προσομοιώνεται πρώτη. Έπειτα προσομοιώνονται οι υπόλοιπες μεταβλητές, οι οποίες παράγονται τυχαία από συγκεκριμένες εξαρτημένες κατανομές. Για παράδειγμα στη μοντελοποίηση ενός υπόγειου υδροφορέα :

1. Το πορώδες $\Phi(u) = Z_1(u)$ προσομοιώνεται πρώτο καθώς αποτελεί στις περισσότερες εφαρμογές τη μεταβλητή με τις μικρότερες διακυμάνσεις στο πεδίο.

2. Η οριζόντια διαπερατότητα $K_h(u) = Z_2(u)$ προσομοιώνεται μετά από την εξαρτημένη κατανομή :

$$\text{Prob}\{ K_h(u) \leq z_2 | \Phi(u) = z_1^{(1)} \} \quad (6.64)$$

του προσομοιωμένου πορώδους $z_1^{(1)}$ στην ίδια θέση. Τέτοιες εξαρτημένες κατανομές προκύπτουν απευθείας από το διάγραμμα διασποράς της K_h σε σχέση με τη Φ στις ίδιες πάντα θέσεις u .

3. Έπειτα, δεδομένης της προσομοιωμένης τιμής της οριζόντιας διαπερατότητας $K_h(u) = z_2(u)$, παράγεται τυχαία η προσομοιωμένη τιμή της κάθετης διαπερατότητας από το διάγραμμα διασποράς της K_h σε σχέση με τη K_v στις θέσεις u .

Η προσέγγιση της εξίσωσης 6.64 επιτρέπει την τυχαία παραγωγή της τιμής της μεταβλητής $Z(u)$ από την εξαρτημένη της κατανομή, δεδομένης της τιμής της καλύτερης συσχετιζόμενης συμμεταβλητότητας στην ίδια θέση u . Η Αρχή της Ακολουθιακής Προσομοίωσης είναι μια γενίκευση αυτής της ιδέας. Η εξάρτηση επεκτείνεται για να περιλάβει δεδομένα της γειτονιάς του u , περιέχοντας τα αρχικά δεδομένα και τις προηγούμενες προσομοιωμένες τιμές.

Αν θεωρηθεί η από κοινού κατανομή N τυχαίων μεταβλητών Z_i , με N πιθανόν πολύ μεγάλο, τότε οι N τυχαίες μεταβλητές RVs Z_i μπορεί να αναπαριστούν την ίδια συμπεριφορά στους N κόμβους ενός καννάβου στο πεδίο A , ή να αναπαριστούν N διαφορετικές συμπεριφορές μετρημένες στην ίδια θέση, ή ακόμη να αναπαριστούν ένα συνδυασμό από K διαφορετικές συμπεριφορές καθορισμένες στους N' κόμβους ενός καννάβου με $N = K * N'$. Αν στη συνέχεια θεωρηθεί η συνθήκη αυτών των N τυχαίων μεταβλητών, από ένα σύνολο n δεδομένων που συμβολίζεται με (n) , τότε η ανταποκρινόμενη N μεταβαλλόμενη *ccdf* δηλώνεται :

$$F_{(N)}(z_1, \dots, z_N | n) = \text{Prob}\{Z_i \leq z_i, i=1, \dots, N | (n)\} \quad (6.65)$$

Η εξίσωση 6.65 είναι γενική χωρίς περιορισμούς. Ακολουθιακή εφαρμογή της εξαρτημένης πιθανολογικής σχέσης δείχνει ότι η τυχαία διαλογή μιας N μεταβλητής από τη *ccdf* μπορεί να πραγματοποιηθεί σε N διαδοχικά βήματα, που το καθένα περιέχει μια αμετάβλητη *ccdf* με αυξανόμενο βαθμό εξάρτησης. Έτσι :

- 1 Διαλέγεται τυχαία η τιμή $z_1^{(1)}$ από την αμετάβλητη *ccdf* της Z_1 δεδομένης των αρχικών δεδομένων (n) . Η τιμή $z_1^{(1)}$ θεωρείται περιοριστικό δεδομένο για τις επόμενες τυχαίες διαλογές. Επίσης το σύνολο των δεδομένων (n) ανανεώνεται σε $(n+1) = (n) \cup \{Z_1 = z_1^{(1)}\}$.
- 2 Διαλέγεται τυχαία η τιμή $z_2^{(1)}$ από την αμετάβλητη *ccdf* της Z_2 δεδομένης των αρχικών δεδομένων $(n+1)$. Έπειτα το σύνολο των δεδομένων $(n+1)$ ανανεώνεται σε $(n+2) = (n+1) \cup \{Z_2 = z_2^{(1)}\}$.
- 3 Η διαδικασία συνεχίζεται διαδοχικά για όλες τις N τυχαίες μεταβλητές RVs Z_i .

Το σύνολο $\{z_i^{(1)}, i = 1, \dots, N\}$ αναπαριστά μια από κοινού προσομοιωμένη απεικόνιση των N τυχαίων μεταβλητών Z_i . Αν απαιτείται και άλλη απεικόνιση $\{z_i^{(1')}, i =$

$1, \dots, N$ επαναλαμβάνεται ολόκληρη η διαδικασία ακολουθιακής τυχαίας διαλογής. Αυτή η ακολουθιακή διαδικασία προσομοίωσης απαιτεί τον καθορισμό των N αμετάβλητων *ccdf*, δηλαδή :

$$\text{Prob} \{ Z_1 \leq z_1 | (n) \}$$

$$\text{Prob} \{ Z_2 \leq z_2 | (n+1) \}$$

$$\text{Prob} \{ Z_3 \leq z_3 | (n+2) \}$$

$$\text{Prob} \{ Z_N \leq z_N | (n+N-1) \} \quad (6.66)$$

Η αρχή της ακολουθιακής προσομοίωσης είναι ανεξάρτητη από τον αλγόριθμο ή το μοντέλο που χρησιμοποιείται για να καθιερώσει τη διαδοχή των αμετάβλητων *ccdf*. Στις περισσότερες εφαρμογές οι N RVs, των οποίων οι N μεταβλητές *ccdf* προκύπτουν σύμφωνα με τις N θέσεις u_i μιας τυχαίας συνάρτησης $RF Z(u)$, αναφέρονται σε μια και μόνο συμπεριφορά – ιδιότητα z . Ο αλγόριθμος της ακολουθιακής προσομοίωσης απαιτεί γνώση των N αμετάβλητων *ccdf*. Αυτές οι αμετάβλητες *ccdf* δεν είναι κανονικές και δεν προσδιορίζονται εξ' ολοκλήρου από τις μέσες τιμές και τις αποκλίσεις τους, εκτός αν η $Z(u)$ μοντελοποιείται σαν μια τυχαία συνάρτηση Gauss. Ευτυχώς, εάν κάποιος επιθυμεί μόνο αναπαραγωγή της z – συμμεταβλητότητας (ή βαριογράμματος) από τα σύνολα των προσομοιωμένων τιμών $\{z^{(i)}(u_i), i = 1, \dots, N, \forall i\}$, αρκεί κάθε μια από τις αμετάβλητες N *ccdf* της εξίσωσης 6.66 να αναγνωρίσει τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της Simple Kriging της ανταποκρινόμενης $RV Z(u)$ με τα $(n+i-1)$ δεδομένα.

6.5.7. Κανονική Προσομοίωση (Gaussian Simulation)

Το μοντέλο της κανονικής τυχαίας συνάρτησης RF είναι μοναδικό σε στατιστικό επίπεδο για την πολύ μεγάλη αναλυτική απλότητά του και αποτελεί την πιο εξελιγμένη κατανομή από πολλά αναλυτικά θεωρήματα ,που είναι γνωστά με το όνομα «κεντρικά οριακά θεωρήματα». Σε ένα πεδίο, εάν το συνεχές χωρικό φαινόμενο $\{ z(u), u \in A \}$ αποτελεί άθροισμα από έναν (όχι και τόσο μεγάλο) αριθμό ανεξάρτητων πηγών $\{ y_k(u), u \in A \}$, $k = 1, \dots, K$, με παρόμοιες χωρικές κατανομές, τότε η χωρική του κατανομή μπορεί να μοντελοποιηθεί από ένα κανονικής τυχαίας συνάρτησης RF :

$$Z(u) = \sum_{k=1}^K Y_k(u) \approx \text{Κανονικής} \quad (6.67)$$

Ο οριακός περιορισμός δεν είναι ο αριθμός K , ή το γεγονός ότι οι συνιστώσες $Y_k(u)$ είναι ισοδύναμα κατανεμημένες, αλλά η υπόθεση της ανεξαρτησίας των $Y_k(u)$. Τα Κανονικά μοντέλα είναι αρκετά οικεία, εύκολα στην κατανόηση και έχουν τεράστια επιτυχία στις εφαρμογές. Όλα τα παραπάνω είναι αρκετά για να κάνουν το Κανονικό μοντέλο την καλύτερη επιλογή για τη μοντελοποίηση των συνεχών μεταβλητών.

Ο κλασικός ορισμός μιας κανονικής κατανομής μπορεί να βρεθεί σε οποιοδήποτε βιβλίο στατιστικής. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας *PDF* της ορίζεται ως :

$$F(u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u-\mu}{\sigma}\right)^2\right], \quad -\infty < u < \infty \quad (6.68)$$

όπου μ είναι η μέση τιμή και σ η τυπική απόκλιση. Το γράφημα της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας *PDF* της δίνεται στο Σχήμα 6.11 για: α) $\mu = 8, \sigma = 1$ β) $\mu = 5, \sigma = 2$ γ) $\mu = 5, \sigma = 4$.

Η τυχαία συνάρτηση $RF \ Y(u) = \{Y(u), u \in A\}$ είναι κανονική όταν ισχύουν τα παρακάτω :

- 1 όλα τα υποσύνολα της RF , για παράδειγμα $\{Y(u), u \in B \subset A\}$ είναι επίσης κανονικά
- 2 όλοι οι γραμμικοί συνδυασμοί των συνιστωσών $Y(u)$ είναι κανονικά κατανομημένοι $X = \sum_{a=1}^n \omega_a Y(u_a)$ εφ' όσον $u_a \in A$.
- 3 μηδενική συµμεταβλητότητα (ή αυτοσυσχέτιση) συνεπάγεται πλήρης ανεξαρτησία : εάν $\text{Cov}\{Y(u), Y(u')\} = 0$, οι δύο τυχαίες μεταβλητές $RVs \ Y(u)$ και $Y(u')$ δεν είναι μόνο μη αυτοσυσχετιζόμενες, αλλά και ανεξάρτητες.
- 4 όλες οι εξαρτημένες κατανομές ενός οποιουδήποτε υποσυνόλου της $RF \ Y(u)$, δίνοντας τις απεικονίσεις από κάποιο άλλο υποσύνολο, είναι κανονικές. Για παράδειγμα, η εξαρτημένη κατανομή των $K \ RVs \ \{Y_k(u'_k), k=1, \dots, K, u'_k \in A\}$, που δίνει τις απεικονίσεις $y(u_a) = y_a, a=1, \dots, n$, είναι κανονική για κάθε K, u'_k, n, u_a, y_a .

Η υπόθεση $K=1, u'_1 = u_0$, όπου η τυχαία μεταβλητή $RV \ Y(u_0)$ μοντελοποιεί την αβεβαιότητα για μια συγκεκριμένη μη δειγματοληπτική τιμή $y(u_0)$, έχει ξεχωριστό ενδιαφέρον: Η εξαρτημένη αθροιστική συνάρτηση κατανομής *ccdf* της $Y(u_0)$ είναι κανονική και πλήρως χαρακτηριζόμενη από :

- 1 τη μέση τιμή της, όπως αυτή προσδιορίζεται από την Απλού Kriging *SK* εκτίμησή της $y(u_0)$

$$E\{Y(u_0)|y(u_a) = y_a, a=1, \dots, n\} \equiv [y(u_0)]_{SK}^* \equiv$$

$$m(u_0) + \sum_{a=1}^n \lambda_a [y_a - m(u_a)] \quad (6.69)$$

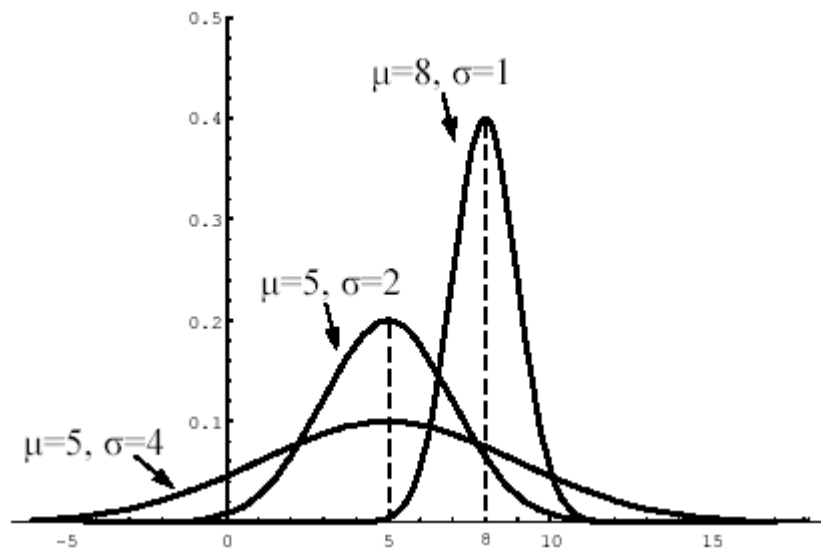
όπου $m(u) = E\{Y(u)\}$ είναι η αναμενόμενη τιμή της (όχι απαραίτητα στάσιμης) $RV \ Y(u)$. Τα n βάρη λ_a δίνονται από το Απλού Kriging *SK* σύστημα :

$$\sum_{\beta=1}^n \lambda_{\beta} C(u_{\beta}, u_{\alpha}) = C(u_0, u_{\alpha}), \alpha = 1, \dots, n \quad (6.70)$$

όπου $C(u, u') = \text{Cov}\{Y(u), Y(u')\}$ είναι η συµμεταβλητότητα (όχι απαραίτητα στάσιμη) της $RF \ Y(u)$.

- 2 την τυπική της απόκλιση, η οποία είναι η Απλού Kriging *SK* απόκλιση :

$$\text{Var}\{Y(u_0)|y(u_\alpha) = y_\alpha, \alpha = 1, \dots, n\} = C(u_0, u_0) - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha C(u_0, u_\alpha) \quad (6.71)$$



Σχήμα 6. 11. Γράφημα Συνάρτησης Πυκνότητας Πιθανότητας PDF

6.5.8. Ακολουθιακή Κανονική Προσομοίωση (Sequential Gaussian Simulation)

Ο *sgsim* αποτελεί τον πιο εμπρόσθιο αλγόριθμο για την παραγωγή απεικονίσεων ενός κανονικού πεδίου, από τους διαδοχικούς αλγορίθμους. Κάθε μεταβλητή προσομοιώνεται διαδοχικά, σύμφωνα με την κανονική εξαρτημένη αθροιστική συνάρτηση κατανομής *ccdf*, που προέκυψε μέσω ενός συστήματος Απλού (*Simple*) ή κανονικού (*Ordinary*) Kriging όπως στην εξίσωση 6.70. Τα εξαρτημένα δεδομένα αποτελούνται από όλα τα αρχικά δεδομένα συν όλες τις προηγούμενες προσομοιωμένες τιμές, που βρίσκονται στη γειτονιά της υπό προσομοίωσης περιοχής.

Η εξαρτημένη προσομοίωση μιας συνεχούς μεταβλητής $z(u)$ μοντελοποιείται από τις παρακάτω διαδικασίες μιας στάσιμης κανονικής *RF* $Z(u)$:

1. Καθορίζεται η αμετάβλητη *cdf* $F_Z(z)$, αντιπροσωπευτική ολόκληρου του υπό μελέτη πεδίου και όχι μόνο των διαθέσιμων z δεδομένων. Μπορεί να απαιτείται αποδέσμευση (*decluster*) σε περίπτωση που τα δεδομένα είναι συγκεντρωμένα σε κάποια περιοχή του πεδίου, ή εξομάλυνση (*smoothing*) αν αυτά είναι λίγα και διάσπαρτα.
2. Χρησιμοποιώντας την *cdf* $F_Z(z)$, πραγματοποιείται ο κανονικός μετασχηματισμός των z δεδομένων στα αντίστοιχα y με μια τυπικά κανονική *cdf*.
3. Αφού το Γκαουσιανό *RF* μοντέλο μπορεί να αντικατασταθεί από την μεταβλητή y , η διαδικασία προχωρά με τον αλγόριθμο *sgsim* και την ακολουθιακή προσομοίωση:

- Καθορίζεται ένας τυχαίος δρόμος, με τον οποίο η διαδικασία πηγαίνει από κελί σε κελί μέσα στον κάνναβο, αλλά για μια φορά. Σε κάθε κόμβο u , παραμένει ένας συγκεκριμένος αριθμός που προέρχεται από τον περιορισμό της γειτνίασης των δεδομένων, περιέχοντας και τα αρχικά δεδομένα y και τις προσομοιωμένες από πριν τιμές y .
 - Χρησιμοποιείται η Απλή (*Simple*) ή Κανονική (*Ordinary*) Kriging μαζί με το κανονικό μεταβλητόγραμμα για τον καθορισμό των παραμέτρων (μέση τιμή, τυπική απόκλιση) της εξαρτημένης αθροιστικής συνάρτησης κατανομής $ccdf$ της RF $Y(u)$, στη θέση u .
 - Επιλέγεται τυχαία μια προσομοιωμένη τιμή $y^{(l)}(u)$ από αυτήν τη $ccdf$.
 - Η προσομοιωμένη αυτή τιμή $y^{(l)}(u)$ προστίθεται στο σύνολο των δεδομένων.
 - Προχωρά στον επόμενο κόμβο και επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέχρι να προσομοιωθούν όλοι οι κόμβοι.
4. Μετασχηματίζονται προς τα πίσω (backtransform) οι προσομοιωμένες κανονικές τιμές $\{y^{(l)}(u), u \in A\}$ στις προσομοιωμένες τιμές των αρχικών μεταβλητών $\{z^{(l)}(u) = \phi^{(-1)}(y^{(l)}(u)), u \in A\}$.

Πολλαπλές Απεικονίσεις

Εάν απαιτούνται πολλαπλές απεικονίσεις $\{z^{(l)}(u), u \in A\}$, $l = 1, \dots, L$, ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται L φορές με κάποια από τις δύο παρακάτω διαδικασίες:

1. Με τον ίδιο τυχαίο δρόμο η διαδικασία πηγαίνει από κελί σε κελί μέσα στον κάνναβο. Σε αυτήν την περίπτωση η διαμόρφωση των δεδομένων και τα Kriging συστήματα παραμένουν ίδια για κάθε προσομοίωση. Χρειάζεται να λυθούν μόνο μια φορά.
2. Χρησιμοποιείται διαφορετικός δρόμος για κάθε προσομοίωση. Η ακολουθία της διαμόρφωσης των δεδομένων είναι διαφορετική. Επίσης πρέπει να δημιουργούνται κάθε φορά διαφορετικά Kriging συστήματα και να επιλύονται.

Απλή (*Simple*) ή Κανονική (*Ordinary*) Kriging?

Η αποδοχή της στασιμότητας (*stationarity*) απαιτεί στο δεύτερο βήμα του *SGSIM* αλγορίθμου τη χρήση της Απλής Kriging με μηδενική μέση τιμή. Στην περίπτωση που τα δεδομένα είναι αρκετά ώστε να θεωρηθεί το RF μοντέλο μη στάσιμο (*nonstationary*), τότε πρέπει:

1. να θεωρηθεί μια σειρά από τοπικές αρχικές SK μέσες τιμές (διαφορετική του μηδενός), για να χρησιμοποιηθεί στην εξίσωση 6.69. Αυτό γίνεται για να αποφευχθεί η Κανονική Kriging, δίνοντας τοπικές μη στάσιμες μέσες τιμές, που προέρχονται από άλλη πηγή πληροφοριών ή

2. να διασπαστεί η περιοχή σε ξεχωριστές ζώνες και να θεωρηθεί για κάθε μία ένα διαφορετικό στάσιμο *RF* μοντέλο, το οποίο υποδηλώνει την παρουσία διαφορετικού ιστογράμματος και κανονικού μεταβλητογράμματος για κάθε ζώνη ή
3. να θεωρηθεί ένα στάσιμο κανονικό μεταβλητόγραμμα, προερχόμενο από όλα τα δεδομένα και μία μη στάσιμη μέση τιμή για $Y(u)$. Η μη στάσιμη μέση τιμή, $E\{Y(u)\}$, σε κάθε θέση u , επανεκτιμάται από τα γειτονικά δεδομένα μέσω της Απλής Kriging. Το αντίτιμο από αυτήν την τοπική αναφορά είναι η αναπαραγωγή ενός φτωχότερου στάσιμου Y ιστογράμματος και μεταβλητογράμματος.

Τα δεδομένα της υδραυλικής αγωγιμότητας δεν είναι όμως αρκετά, ώστε να απαιτείται η παραπάνω διαδικασία. Γίνεται, επίσης, κατανοητό ότι προτιμάται η επιλογή της Απλής Kriging, διότι δίνει πληρέστερα μοντέλα, αυτό όμως δεν κάνει απαγορευτική τη χρήση της Κανονικής Kriging, αφού υπάρχουν περιπτώσεις που η τελευταία είναι εξίσου χρήσιμη.

6.6. Μοντέλο διαχείρισης της υπόγειας ροής

Το μοντέλο διαχείρισης που επιλέχθηκε είναι το GWM (Ground-Water Management Process) (Ahlfeld, et al., 2005) και είναι μια νέα προσθήκη για το MODFLOW 2000. Το GWM επιλύει πολλά είδη γραμμικών, μη γραμμικών και μικτών δυαδικών γραμμικών προβλημάτων διαχείρισης της υπόγειας ροής. Το πακέτο RMS (Response Matrix Solution package), που έχει εφαρμοσθεί ευρέως σε μοντέλα διαχείρισης υπόγειων υδάτων, χρησιμοποιείται εδώ για να μετατρέψει ένα πρόβλημα διαχείρισης υπόγειων υδάτων σε πρόβλημα βελτιστοποίησης που θα μπορεί να επιλυθεί από το GWM. Το GWM χρησιμοποιεί τους αλγόριθμους βελτιστοποίησης simplex και branch and bound για να επιλύσει το αποτέλεσμα της παραπάνω μετατροπής: αυτοί οι αλγόριθμοι έχουν κωδικοποιηθεί εντός του GWM σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN-90. Στην τρέχουσα μορφή του, το GWM μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο με τις λειτουργίες GWF (Ground-Water Flow) και Global Processes του MODFLOW-2000· δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τις λειτουργίες Ground-Water Transport, Observation, Sensitivity, or Parameter-Estimation Processes.

Η προέλευση του GWM είναι ο κώδικας MODOFC που αναπτύχθηκε από τους Ahlfeld και Riefler (2003). Ο κώδικας MODOFC βασίζεται στην έκδοση MODFLOW-96 του MODFLOW (Harbaugh και McDonald, 1996). Αρκετές αλλαγές έχουν γίνει κατά τη μετάβαση από τον κώδικα MODOFC στον GWM. Πρώτον, οι τύποι των μεταβλητών απόφασης και των περιορισμών που μπορούσαν να διευκρινιστούν από ένα μοντέλο διαχείρισης έχουν τροποποιηθεί και επεκταθεί. Για παράδειγμα, σήμερα είναι δυνατόν να συμπεριληφθεί στο μοντέλο μια μεταβλητή απόφασης που αντιπροσωπεύει μια εξωτερική πηγή νερού. Δεύτερον, έχει τροποποιηθεί η δομή των αρχείων που εισάγουν δεδομένα (input files) και των αρχείων που παράγουν τα αποτελέσματα (output files). Με τη νέα μορφή των αρχείων, χρησιμοποιούνται ξεχωριστά input files κάθε φορά για να καθορίσουν τις μεταβλητές απόφασης, την αντικειμενική συνάρτηση, τους περιορισμούς και την τεχνική επίλυσης. Η νέα αυτή δομή επιδιώκει να διευκολύνει τη

διαδικασία μετατροπής της κάθε μορφής διαχείρισης σε τέτοια που θα μπορεί να επιλυθεί από το GWM. Επίσης η αναθεωρημένη δομή πρέπει να καταστήσει ευκολότερη τη διαδικασία ανάπτυξης νέων δυνατοτήτων και νέων υπορουτίνων για το GWM. Τέλος, έγιναν πολλές αλλαγές στον αρχικό κώδικα MODFC FORTRAN· σε αυτές τις αλλαγές περιλαμβάνεται η οργάνωση των υπορουτίνων σε ενότητες και τα πακέτα που συνάδουν με την όλη δομή του MODFLOW-2000.

6.6.1. Διατύπωση προβλημάτων διαχείρισης υπόγειων υδάτων με τη χρήση του GWM.

Ένα πρόβλημα διαχείρισης υπόγειων υδάτων αποτελείται από τρία στοιχεία: τις μεταβλητές απόφασης (decision variables), την αντικειμενική συνάρτηση (objective function) και ένα σύνολο από περιορισμούς (constraints). Όλα αυτά μαζί καθορίζουν ένα μαθηματικό μοντέλο διαχείρισης και λήψης αποφάσεων. Οι μεταβλητές απόφασης (decision variables) ενός προβλήματος διαχείρισης είναι τα ποσοτικά στοιχεία ελέγχου (ή απόφασης) που θα καθοριστούν από το μοντέλο, όπως είναι οι τιμές άντλησης από ένα σύνολο ελεγχόμενων πηγαδιών (managed wells). Οι τιμές που θα καθοριστούν από το GWM για αυτές τις μεταβλητές ελέγχου καθορίζουν τη λύση του προβλήματος. Η αντικειμενική συνάρτηση (objective function) του προβλήματος, η οποία καθορίζεται από μία ή περισσότερες μεταβλητές απόφασης, είναι ένα μέτρο ελέγχους της απόδοσης της διαδικασίας σχεδιασμού. Χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει ανάμεσα σε πολλές πιθανές λύσεις την καλύτερη. Η συνάρτηση αυτή μπορεί να μεγιστοποιείται ή να ελαχιστοποιείται, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή του GWM. Η τρίτη συνιστώσα ενός προβλήματος διαχείρισης είναι ένα σύνολο από περιορισμούς (constraints) οι οποίοι θέτουν όρια στις τιμές που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές απόφασης. Η λύση ενός καλά διατυπωμένου προβλήματος διαχείρισης υπόγειων υδάτων περιέχει τις τιμές των μεταβλητών αποφάσεων που βελτιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση ενώ παράλληλα ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς που έχουν τεθεί σε αυτές.

Το GWM υποστηρίζει τρεις τύπους μεταβλητών απόφασης: αυτές που συσχετίζονται με την παροχή (flow-rate decision variables), τις εξωτερικές (external decision variables) και τις δυαδικές (binary variables). Θα παρουσιαστούν μόνο οι μεταβλητές απόφασης που σχετίζονται με την παροχή, μιας και αυτό γίνεται στην εν λόγω έρευνα.

Ο κύριος τύπος μεταβλητής απόφασης είναι μια παροχή άντλησης (αποφόρτισης) ή μια παροχή εμπλουτισμού (επαναφόρτισης) σε μια ελεγχόμενη θέση πηγαδιού, Q_{wn} . Όλες αυτές οι μεταβλητές αντιμετωπίζονται από το GWM σαν θετικές, είτε αντιπροσωπεύουν άντληση (withdrawal) είτε εμπλουτισμό (injection). Για αυτές που αντιπροσωπεύουν άντληση, το GWM μετατρέπει εσωτερικά το σωστό πρόσημο με αυτό της διαδικασίας GWF του MODFLOW (Ground-Water Flow). Κάθε μεταβλητή απόφασης που αφορά παροχή μπορεί να επεκτείνεται σε περισσότερα από ένα κελιά του μοντέλου και μπορεί να είναι ενεργή σε περισσότερες από μία περιόδους άντλησης (stress periods). Οι περίοδοι άντλησης, στις οποίες η μεταβλητή απόφασης έχει καθοριστεί να είναι ενεργή δεν είναι αναγκαίο να έχουν την ίδια διάρκεια. Στην απλούστερη περίπτωση, μία παροχή Q_{wn} είναι ο ρυθμός άντλησης ή εμπλουτισμού σε ένα μόνο κελί κατά τη διάρκεια μίας μόνο περιόδου άντλησης. Σε πιο σύνθετα

προβλήματα, η παροχή Q_{wn} μπορεί να αποτελείται από ένα σύνολο κάθετων κελιών τα οποία προσομοιώνουν την άντληση από ένα πηγάδι που εκτείνεται σε αρκετά στρώματα του μοντέλου (model layers), ή από ένα σύνολο κελιών του ίδιου στρώματος που αντιπροσωπεύουν την αθροιστική άντληση από πολλά πηγάδια που ανήκουν σε μια υποπεριοχή του πεδίου ορισμού του μοντέλου. Αν και κάθε μεταβλητή απόφασης μπορεί να εκτείνεται σε πολλαπλά κελιά και για πολλές περιόδους άντλησης, η παροχή που έχει καθοριστεί για κάθε μεταβλητή απόφασης είναι μία ενιαία τιμή που είναι σταθερή για κάθε περίοδο άντλησης που αυτή είναι ενεργή, και έχει κατανεμηθεί σε κάθε κελί της περιοχής που εκτείνεται με βάση το ποσοστό που καθορίζεται από τον χρήστη. Κάθε μεταβλητή απόφασης που αφορά παροχή αντιπροσωπεύει είτε άντληση είτε εμπλουτισμό στη θέση του πηγαδιού: μία μοναδική μεταβλητή απόφασης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άντληση και για εμπλουτισμό. Ωστόσο, ο χρήστης μπορεί να καθορίσει δύο μεταβλητές για μια θέση, η οποία να έχει καθοριστεί από το ίδιο σύνολο κελιών και περιόδων άντλησης, με την πρώτη να αφορά άντληση πηγαδιού και τη δεύτερη εμπλουτισμό πηγαδιού. Επιπρόσθετα, για μη σταθερά μοντέλα στον χρόνο (transient models), μια μόνο θέση πηγαδιού μπορεί να συσχετίζεται με περισσότερες από μία παροχές, όπου κάθε μία από αυτές θα καταλαμβάνει την ίδια θέση στην περιοχή αλλά θα παραμένει ενεργή σε διαφορετικές περιόδους άντλησης. Αυτή είναι μια συνήθη κατάσταση για τα πηγάδια στα οποία ο ρυθμός άντλησής τους μεταβάλλεται χρονικά.

Είναι σημαντικό να αναγνωρίζεται η διαφορά των ροών που έχουν προσομοιωθεί από τα πακέτα Well (WEL) ή Multi-Node Well (MNW) του MODFLOW, από τις ροές που καθορίστηκαν σαν μεταβλητές απόφασης για ένα πρόβλημα του GWM. Για το σκοπό ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, οι ροές που προσομοιώνονται από τα πακέτα WEL (Harbaugh και McDonald, 2000) ή MNW (Halford και Hanson, 2002) και περιέχουν τιμές άντλησης ή εμπλουτισμού που έχει καθορίσει ο χρήστης, αναφέρονται ως μη ελεγχόμενα πηγάδια (unmanaged wells). Αυτά τα μη ελεγχόμενα πηγάδια άντλησης ή εμπλουτισμού θεωρούνται δευτερεύουσες πιέσεις (background stresses), με την έννοια ότι θα συνεισφέρουν στη συνολική πίεση του υπόγειου συστήματος ροής σε περίπτωση απουσίας ελεγχόμενων αντλήσεων ή εμπλουτισμών (managed withdraws or injections). Αντιθέτως, για μια μεταβλητή απόφασης συσχετισμένη με παροχή (flow-rate decision variable) καθορισμένη μέσα σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης η τιμή άντλησης ή εμπλουτισμού είναι άγνωστη στην αρχή του προβλήματος, και καθορίζεται σαν κομμάτι της τελικής λύσης. Οι παροχές που ορίζονται σαν μεταβλητές απόφασης αναφέρονται ως ελεγχόμενες ροές (managed flows), γιατί είναι μέρος της λύσης διαχείρισης του προβλήματος. Στην αρχή ενός προβλήματος, οι ελεγχόμενες ροές (managed flows) είναι υποψήφιες προς επιλογή για το τελικό σύνολο των ενεργών (που σημαίνει μη μηδενικών) μεταβλητών αποφάσεων που συσχετίζονται με τη ροή (flow-rate decision variables) οι οποίες συνθέτουν την τελική λύση. Είναι πιθανόν μερικές από τις υποψήφιες μεταβλητές απόφασης να μην επιλεγούν σαν μέρος της τελικής λύσης του προβλήματος, οπότε θα καταστούν ανενεργές (οι υπολογισμένες τιμές άντλησης ή εμπλουτισμού θα είναι μηδενικές).

Το GWM επιτρέπει την ταυτόχρονη χρήση των ελεγχόμενων και των μη ελεγχόμενων πηγαδιών στα κελιά του μοντέλου. Για παράδειγμα, ο χρήστης μπορεί να προσδιορίσει μία μη ελεγχόμενη τιμή άντλησης (που αποτελεί background stress) $1 \text{ m}^3/\text{s}$ σε ένα συγκεκριμένο κελί με τη βοήθεια του πακέτου WEL: ο χρήστης όμως μπορεί επίσης να ορίσει και μία ελεγχόμενη τιμή άντλησης στο ίδιο κελί με τη χρήση μιας μεταβλητής απόφασης παροχής στο GWM. Η συνολική τιμή άντλησης σε αυτό το κελί στο τέλος του τρεξίματος του GWM θα ήταν ίση με το άθροισμα της μη ελεγχόμενης τιμής άντλησης που καθορίστηκε από τον χρήστη ($1 \text{ m}^3/\text{s}$) και της ελεγχόμενης τιμής άντλησης που θα υπολογίσει το GWM για τη μεταβλητή απόφασης που αντιπροσωπεύει. Αν και οι μεταβλητές απόφασης παροχής που περιγράφηκαν αναφέρονταν μόνο σε πηγάδια (και προσομοιώνονται από το GWM με τον ίδιο χαρακτηριστικό τρόπο που προσομοιώνονται και από το πακέτο WEL του MODFLOW), αυτές μπορούν να αποτελέσουν και άλλους τύπους διαχειριζόμενων πιέσεων (managed stresses) σε ένα υπόγειο σύστημα υδάτων, όπως ο ρυθμός επαναφόρτισης μιας τεχνητής λεκάνης εμπλουτισμού ή ο ρυθμός διαρροής από ένα αρδευτικό δίκτυο.

Το GWM υποστηρίζει μία μόνο αντικειμενική συνάρτηση, η οποία ελαχιστοποιεί ή μεγιστοποιεί το σταθμισμένο άθροισμα των τριών τύπων μεταβλητών απόφασης:

$$\sum_{n=1}^N \beta_n Q_{w_n} T_{Q_{w_n}} + \sum_{m=1}^M \gamma_m E x_m T_{E x_m} + \sum_{l=1}^L \kappa_l I_l \quad (6.72)$$

όπου:

- β_n , το κόστος ή το όφελος ανά μονάδα όγκου νερού που αντλείται ή διοχετεύεται στο πηγάδι n
- γ_m , το κόστος ή το όφελος ανά μονάδα όγκου νερού που εισάγεται ή εξάγεται σε ένα μέρος εκτός του συστήματος
- κ_l , η μονάδα κόστους ή οφέλους που συσχετίζεται με τη δυαδική μεταβλητή I_l
- $T_{Q_{w_n}}$, η συνολική διάρκεια της ροής στη θέση του πηγαδιού n
- $T_{E x_m}$, η συνολική διάρκεια της ροής σε ένα μέρος εκτός συστήματος m και
- N,M,L ο συνολικός αριθμός των τριών τύπων μεταβλητών απόφασης, αντίστοιχα.

Τα $T_{Q_{w_n}}$ και $T_{E x_m}$ υπολογίζονται από το GWM προσθέτοντας τη διάρκεια όλων των περιόδων άντλησης κατά την οποία οι n και m μεταβλητές απόφασης είναι ενεργές. (Το GWM δεν απαιτεί οι περίοδοι άντλησης που διευκρινίστηκαν στο MODFLOW να είναι ίδιας διάρκειας). Οι συντελεστές β_n , γ_m και κ_l ονομάζονται συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης.

Η εξίσωση 6.72 μπορεί να ληφθεί με όρους οικονομικού κόστους ή οφέλους από την άντληση, τον εμπλουτισμό, την εισαγωγή, ή την εξαγωγή νερού στο μοντέλο διαχείρισης, έτσι ώστε κάθε ένας από τους τρεις τύπους των μεταβλητών απόφασης να είναι σε νομισματικές μονάδες. Ο πρώτος όρος στην εξίσωση 6.72 είναι το κόστος (ή το

όφελος) που προέρχεται από την άντληση ή τον εμπλουτισμό μιας θέσης με νερό και αφορά τις μεταβλητές απόφασης παροχής. Ο δεύτερος όρος είναι το κόστος (ή το όφελος) από την εισαγωγή ή την εξαγωγή νερού και αφορά τις εξωτερικές μεταβλητές απόφασης, και ο τρίτος όρος είναι το κόστος (ή το όφελος) να καταστούν οι δύο πρώτες μεταβλητές απόφασης που συσχετίζονται με κάθε δυαδική μεταβλητή, ενεργές. Επισημαίνεται πως οι συντελεστές στους δύο πρώτους όρους της εξίσωσης (β_n και γ_m) υπονοούν ότι το κόστος (ή το όφελος) του νερού είναι γραμμικά ανάλογο με τον όγκο του νερού που αντλείται, διοχετεύεται, εισάγεται, ή εξάγεται.

Αν και η εξίσωση 6.72 μπορεί να ληφθεί με οικονομικούς όρους, συχνά είναι δύσκολο να προσδιοριστούν οικονομικά κόστη και για οφέλη για όλα τα στοιχεία ενός υδρολογικού προβλήματος διαχείρισης. Σε περιπτώσεις όπου τα οικονομικά κόστη και οφέλη είναι άγνωστα ή δεν χρειάζονται κατά τη διατύπωση του προβλήματος διαχείρισης, ο χρήστης μπορεί να ορίσει τους συντελεστές β_n και γ_m σαν σχετικά κόστη και οφέλη μεταξύ των διαφορετικών μεταβλητών παροχής ή εξωτερικών μεταβλητών. Για παράδειγμα, η αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να μεγιστοποιήσει την άντληση νερού σε n θέσεις πηγαδιών, οπότε οι συντελεστές β_n μπορούν να πάρουν αδιάστατες τιμές ίσες με 1. Τότε η εξίσωση 6.72 θα γινόταν:

$$\text{Maximize} \sum_{n=1}^N 1.0Q_{w_n}T_{Q_{w_n}} \quad (6.73)$$

και το αποτέλεσμα της αντικειμενικής τιμής θα ήταν σύμφωνο με τον συνολικό όγκο του νερού που αντλήθηκε. Εναλλακτικά, ο χρήστης μπορεί να θέλει να τονίσει ότι το όφελος από την άντληση νερού από μία θέση είναι διπλάσιο από το όφελος άντλησης νερού από μία δεύτερη θέση, οπότε σε αυτήν την περίπτωση η αντικειμενική συνάρτηση θα απλοποιούνταν στη μορφή:

$$\text{Maximize}[2.0Q_{w_1}T_{Q_{w_1}} + 1.0Q_{w_2}T_{Q_{w_2}}] \quad (6.74)$$

Ανεξάρτητα από την έννοια που αποδίδεται στους συντελεστές β_n , γ_m , και γ_n στην εξίσωση 6.72, ο χρήστης πρέπει να εξασφαλίσει ότι οι μονάδες αυτών των συντελεστών είναι σταθερές. Όταν το GWM επιλύει το πρόβλημα διαχείρισης, το αντίστοιχο μέγεθος του κάθε όρου στην εξίσωση 6.72 είναι αυτό που θα καθορίσει την τελική λύση.

Το GWM υποστηρίζει τέσσερεις τύπους περιορισμών (constraints) σε ένα πρόβλημα διαχείρισης. Αυτοί οι περιορισμοί μπορούν να χωριστούν γενικά σε δύο κατηγορίες: σε αυτούς για τους οποίους δεν χρειάζεται να δημιουργούνται οι συντελεστές απόκρισης (περιορισμοί απευθείας στις μεταβλητές απόφασης και γραμμικά αθροιστικοί περιορισμοί), και σε αυτούς που χρειάζονται συντελεστές απόκρισης μεταξύ των μεταβλητών απόφασης και των μεταβλητών κατάστασης του υπόγειου συστήματος ροής (περιορισμοί στο υδραυλικό φορτίο και στη ροή του ποταμού). Παρακάτω θα περιγραφτούν μόνο οι περιορισμοί που αφορούν το υδραυλικό φορτίο (hydraulic-head constraints).

Το GWM υποστηρίζει τέσσερεις τύπους περιορισμών στο υδραυλικό φορτίο. Ο πρώτος τύπος περιορισμού είναι ένα ελάχιστο και (ή) ένα μέγιστο κατά απόλυτη τιμή όριο που

τοποθετείται σε ένα φορτίο σε μία συγκεκριμένη θέση για μια συγκεκριμένη περίοδο άντλησης:

$$h_{i,j,k,t} \geq h_{i,j,k,t}^l \quad (6.75)$$

και

$$h_{i,j,k,t} \leq h_{i,j,k,t}^u \quad (6.76)$$

όπου $h_{i,j,k,t}^l$ και $h_{i,j,k,t}^u$ είναι τα καθορισμένα ανώτερα και κατώτερα όρια του φορτίου στη θέση i, j, k (Σχήμα 6.12.A) στο τέλος της περιόδου άντλησης t (δηλαδή, στο τελευταίο χρονικό βήμα της περιόδου άντλησης). Αυτοί οι περιορισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ελέγξουν την υπερβολική ταπείνωση (εξ. 6.75) ή ανύψωση (εξ. 6.76) της πιεζομετρικής επιφάνειας.

Ο δεύτερος τύπος περιορισμού αφορά την πτώση του υδραυλικού φορτίου (drawdown) σε συγκεκριμένη θέση και περίοδο άντλησης. Οι τιμές αυτές συμβολίζονται ως $dd_{i,j,k,t}$ και ισούται με τη διαφορά μεταξύ του αρχικού υδραυλικού φορτίου στη θέση i, j, k στο τέλος της περιόδου άντλησης t , $(h_{i,j,k,t})^0$, και του φορτίου που υπολογίζεται στην ίδια θέση στο τέλος της περιόδου άντλησης t μετά της εφαρμογή της βέλτιστης στρατηγικής διαχείρισης, $h_{i,j,k,t}$:

$$dd_{i,j,k,t} = (h_{i,j,k,t})^0 - h_{i,j,k,t} \quad (6.77)$$

Οι περιορισμοί της πτώσης του υδραυλικού φορτίου γράφονται ως:

$$dd_{i,j,k,t} \geq dd_{i,j,k,t}^l \quad (6.78)$$

και

$$dd_{i,j,k,t} \leq dd_{i,j,k,t}^u \quad (6.79)$$

όπου $dd_{i,j,k,t}^l$ και $dd_{i,j,k,t}^u$ είναι συγκεκριμένο μέγιστο και ελάχιστο όριο στην τιμή που θα προκύψει στην θέση i, j, k στο τέλος της περιόδου άντλησης t (Σχήμα 6.12.B). Η χρήση των περιορισμών στην πτώση του υδραυλικού φορτίου στο GWM προϋποθέτει την χρήση τιμών αναφοράς άντλησης και εμπλουτισμού σε κάθε υπονήφια θέση πηγαδιού. Αυτές οι τιμές αναφοράς χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του αρχικού υδραυλικού φορτίου, $(h_{i,j,k,t})^0$, σε κάθε θέση που ισχύει ο περιορισμός.

Ο τρίτος τύπος περιορισμού είναι ένα ελάχιστο όριο στη διαφορά του υδραυλικού φορτίου μεταξύ δύο διαφορετικών θέσεων του μοντέλου $(i, j, k)_1$ και $(i, j, k)_2$ στο τέλος της περιόδου άντλησης t :

$$(h_{i,j,k,t})_1 - (h_{i,j,k,t})_2 \geq (hdif_{i,j,k,t})_{1,2} \quad (6.80)$$

όπου $(h_{i,j,k,t})_1$ και $(h_{i,j,k,t})_2$ είναι τα υδραυλικά φορτία που υπολογίστηκαν για τις θέσεις $(i, j, k)_1$ και $(i, j, k)_2$ στο τέλος της περιόδου άντλησης t και $(hdif_{i,j,k,t})_{1,2}$ είναι μία συγκεκριμένη κατώτερη τιμή της διαφοράς των φορτίων στις θέσεις 1 και 2 στο τέλος της περιόδου άντλησης t (Σχήμα 6.12.C). Οι δύο αυτές θέσεις μπορούν να είναι κάθετα ή οριζόντια χωρίς να χρειάζεται να είναι σε γειτονικά κελιά. Το GWM προϋποθέτει το υδραυλικό φορτίο στη δεύτερη θέση να είναι μικρότερο από αυτό της πρώτης κατά ένα ελάχιστο ποσό $(hdif_{i,j,k,t})_{1,2}$.

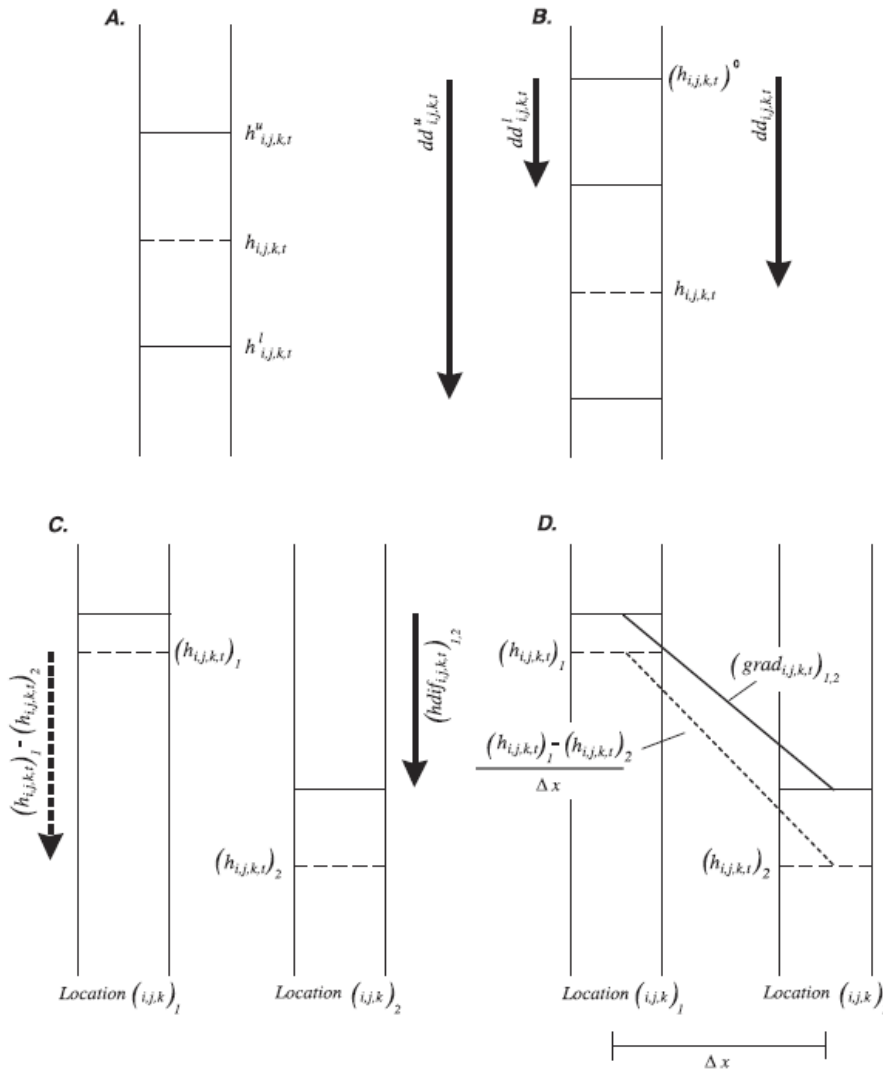
Ο τέταρτος τύπος περιορισμού είναι ένα ελάχιστο όριο στην κλίση του υδραυλικού φορτίου μεταξύ δύο διαφορετικών θέσεων του μοντέλου $(i, j, k)_1$ και $(i, j, k)_2$ στο τέλος της περιόδου άντλησης t . Η κλίση του υδραυλικού φορτίου ανάμεσα σε δύο θέσεις του μοντέλου $((grad_{i,j,k,t})_{1,2})$ είναι:

$$\frac{(h_{i,j,k,t})_1 - (h_{i,j,k,t})_2}{\Delta x} \quad (6.81)$$

όπου $(h_{i,j,k,t})_1$ και $(h_{i,j,k,t})_2$ είναι τα υδραυλικά φορτία που υπολογίστηκαν για τις θέσεις $(i, j, k)_1$ και $(i, j, k)_2$, και Δx η απόσταση ανάμεσα στις δύο θέσεις (Σχήμα 6.12.D). Ο περιορισμός που τίθεται σε εφαρμογή από το GWM είναι:

$$\frac{(h_{i,j,k,t})_1 - (h_{i,j,k,t})_2}{\Delta x} \geq (grad_{i,j,k,t})_{1,2} \quad (6.82)$$

Ο χρήστης πρέπει να καθορίσει δύο θέσεις στο μοντέλο (με το υδραυλικό φορτίο της δεύτερης θέσης να είναι μικρότερο από της πρώτης), μια απόσταση μεταξύ των δύο θέσεων (η οποία μπορεί να είναι η απόσταση μεταξύ των κεντρικών σημείων των κελιών της κάθε θέσης), και ένα ελάχιστο όριο για την κλίση $((grad_{i,j,k,t})_{1,2})$. Οι δύο θέσεις του μοντέλου δεν απαιτείται να είναι γειτονικές.



Σχήμα 6. 12. Τύποι περιορισμών στο υδραυλικό φορτίο που υποστηρίζονται από το GWM (Ahlfeld D.P. et. al., 2005).

6.6.2. Επίλυση προβλημάτων διαχείρισης με χρήση του GWM

Η πλήρης διατύπωση της διαχείρισης υπόγειων υδάτων περιλαμβάνει συνθέσεις γραμμικού προγραμματισμού (linear-programming), μη γραμμικού προγραμματισμού (nonlinear-programming) και δυαδικού προγραμματισμού (binary-programming). Το GWM παρέχει δυνατότητες για επίλυση γραμμικών, μη γραμμικών και μικτών-δυαδικών γραμμικών προβλημάτων. Μικτά-δυαδικά γραμμικά προβλήματα μπορούν επίσης να επιλυθούν αν οι μη γραμμικότητες του συστήματος είναι ήπιες. Ωστόσο, η παρουσία των δυαδικών μεταβλητών σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα, μπορεί να κάνει τη διαδικασία επίλυσης δύσκολη, και μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστες λύσεις ή ψευδή αποτελέσματα. Παρακάτω περιγράφεται ο τρόπος προσέγγισης που χρησιμοποιεί το πακέτο RMS (Response Matrix Solution) για να επιλύσει προβλήματα με γραμμικές συνθέσεις (linear formulations).

Γραμμικά Προβλήματα

Αν το πρόβλημα διαχείρισης των υπόγειων υδάτων που θα επιλυθεί είναι γραμμικό, τότε η αποτελεσματική, αξιόπιστη και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος simplex μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του. Η χρήση του αλγόριθμου προϋποθέτει ότι το σύστημα διαχείρισης υπόγειων υδάτων έχει διατυπωθεί με τη μορφή ενός γραμμικού προγράμματος. Αυτό σημαίνει πρώτον, ότι οι μεταβλητές κατάστασης του συστήματος υπόγειων υδάτων (υδραυλικά φορτία και ροές ποταμών) ανταποκρίνονται γραμμικά στις πιέσεις που εκτίθενται οι μεταβλητές απόφασης της παροχής (flow-rate decision variables) και δεύτερον, ότι δεν θα υπάρχουν δυαδικές μεταβλητές στο σύστημα. Όσον αφορά την πρώτη προϋπόθεση που πρέπει να πληρείται, το σύστημα υπόγειας ροής πρέπει να προσομοιώνεται με σταθερό δείκτη μεταβλητότητας σε κάθε στρώμα, όλες οι οριακές συνθήκες πρέπει να είναι γραμμικές και να απουσιάζουν τα πακέτα που περιέχουν άλλες μη γραμμικότητες. Υδραυλικά φορτία που εξαρτώνται από τις οριακές συνθήκες, όπως αυτά που μπορεί να παρουσιαστούν σε προσομοιωμένα ποτάμια, μπορούν να προκαλέσουν μη γραμμικές αποκρίσεις. Ως εκ τούτου, αν και ενδέχεται να υπάρχουν περιπτώσεις όπου τα ποσοστά διαρροής μεταξύ ενός συστήματος υπόγειων υδάτων και των παρακείμενων ποταμών να είναι γραμμικές (ή σχεδόν γραμμικές) εξισώσεις των υπόγειων υδραυλικών φορτίων και των αντίστοιχων παροχών, οι περιορισμοί στην τιμή της ροής των ποταμών και στη μείωση αυτής αποκλείονται από το πρόβλημα διαχείρισης από αυστηρώς γραμμικά προγράμματα.

Αφαιρώντας τις δυαδικές μεταβλητές από την αντικειμενική συνάρτηση (εξ. 6.72) έχουμε:

Μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση

$$\sum_{n=1}^N \beta_n Q_{w_n} T_{Q_{w_n}} + \sum_{m=1}^M \gamma_m E_{x_m} T_{E_{x_m}} \quad (6.83)$$

που υπόκειται στους προαναφερθέντες περιορισμούς.

Το τελευταίο βήμα για τον μετασχηματισμό του προβλήματος διαχείρισης σε μια μορφή που να μπορεί να επιλυθεί με τη μέθοδο simplex είναι η δημιουργία λειτουργικών σχέσεων μεταξύ των πιέσεων που επιβάλλονται στα ελεγχόμενα πηγάδια (οι μεταβλητές απόφασης που αφορούν παροχές) και των επερχόμενων αλλαγών στα υδραυλικά φορτία στις θέσεις των περιορισμών. Αυτές οι σχέσεις πρέπει να επαναδιατυπώσουν τους περιορισμούς στα υδραυλικά φορτία υπό όρους μεταβλητών αποφάσεων παροχής. Για αυτή τη μετατροπή θα χρησιμοποιηθεί μία επέκταση της σειράς Taylor πρώτης τάξης για να καθορίσει το υδραυλικό φορτίο σε κάθε θέση περιορισμού και περίοδο άντλησης, συναρτήσει των νέων πιέσεων άντλησης και εμπλουτισμού:

$$h_{i,j,k,t}(Q_w) = h_{i,j,k,t}^0(Q_w^0) + \sum_{n=1}^N \frac{\partial h_{i,j,k,t}}{\partial Q_{w_n}}(Q_w^0)(Q_{w_n} - Q_{w_n}^0) \quad (6.84)$$

όπου:

- $h_{i,j,k,t}(Q_w)$, υδραυλικό φορτίο στη θέση περιορισμού i, j, k για την περίοδο άντλησης t για ένα νέο διάνυσμα (δηλαδή, ένα νέο σύνολο) από παροχές άντλησης και εμπλουτισμού Q_w που έχουν επιμέρους στοιχεία Q_{w_n} ,
- $h_{i,j,k,t}^0(Q_w^0)$, υδραυλικό φορτίο στη θέση περιορισμού i, j, k για την περίοδο άντλησης t για ένα αρχικό διάνυσμα (δηλαδή, ένα αρχικό σύνολο που αποτελεί τη βάση) από παροχές άντλησης και εμπλουτισμού Q_w^0 που έχουν επιμέρους στοιχεία $Q_{w_n}^0$,
- $\frac{\partial h_{i,j,k,t}}{\partial Q_{w_n}}$, η αλλαγή στο υδραυλικό φορτίο στη θέση περιορισμού i, j, k για την περίοδο άντλησης t για μία αλλαγή στην παροχή άντλησης ή εμπλουτισμού για τη νιοστή μεταβλητή απόφασης παροχής, που εκτιμάται στο αρχικό διάνυσμα παροχών Q_w^0
- N , ο συνολικός αριθμός των μεταβλητών απόφασης παροχής

Η εξίσωση 6.84 αναφέρει ότι το υδραυλικό φορτίο σε κάθε θέση περιορισμού είναι ίσο: με το υδραυλικό φορτίο στην ίδια θέση για ένα σύνολο αρχικών τιμών άντλησης και εμπλουτισμού Q_w^0 συν το άθροισμα των όποιων αλλαγών στα υδραυλικά φορτία, που προέρχονται από τις αλλαγές στον ρυθμό άντλησης και εμπλουτισμού στις n θέσεις των πηγαιών. Το γραμμικό άθροισμα που ορίζεται στο δεξιό μέλος της εξίσωσης αντανakλά την υποτιθέμενη γραμμικότητα του συστήματος ροής των υπογείων υδάτων και την επακόλουθη γραμμική απόκριση των υδραυλικών φορτίων στις μεταβολές των τιμών άντλησης ή εμπλουτισμού. Οι μερικές παράγωγοι στην εξίσωση 6.84, $\frac{\partial h_{i,j,k,t}}{\partial Q_{w_n}}$

ονομάζονται συντελεστές απόκρισης (response coefficients) και παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την αντίδραση των υπόγειων υδραυλικών φορτίων στις πιέσεις που δέχονται σε κάθε θέση άντλησης ή εμπλουτισμού. Για τα γραμμικά συστήματα, κάθε μερική παράγωγος είναι σταθερή και η τιμή της δεν επηρεάζεται από τις αλλαγές στην κατανομή των τιμών άντλησης και εμπλουτισμού κατά μήκος όλου του υπόγειου συστήματος ροής. Στην εξίσωση 6.84 οι όροι των υδραυλικών φορτίων αντικαθίστανται κάθε φορά από τιμές που ορίζονται από τους περιορισμούς.

Οι μερικές παράγωγοι που καθορίζουν τους συντελεστές απόκρισης δεν υπολογίζονται απ' ευθείας. Αντ' αυτού προσεγγίζονται από μία πρώτη τάξης μέθοδο διαταραχής πεπερασμένων διαφορών (finite-difference perturbation method). Η παράγωγος του υδραυλικού φορτίου σε σχέση με την κάθε μεταβλητή απόφασης παροχής προσεγγίζεται με την εξίσωση των εμπρός διαφορών (forward-difference equation)

$$\frac{\partial h_{i,j,k,t}}{\partial Q_{w_n}} \approx \frac{\Delta h_{i,j,k,t}}{\Delta Q_{w_n}} = \frac{h_{i,j,k,t}(Q_{w_{\Delta n}}) - h_{i,j,k,t}^0(Q_{w^0})}{Q_{w_{\Delta n}}} \quad (6.85)$$

όπου:

- $Q_{w_{\Delta n}}$, η τιμή διαταραχής για τη n-οστή μεταβλητή απόφασης παροχής
- $h_{i,j,k,t}(Q_{w_{\Delta n}})$, το υδραυλικό φορτίο στη θέση περιορισμού i, j, k στην περίοδο άντλησης t που υπολογίζεται από ένα σύνολο περιορισμών στις τιμές άντλησης και εμπλουτισμού $Q_{w_{\Delta n}}$ που διαφέρει από το αρχικό σύνολο Q_{w^0} μόνο στο n-οστό στοιχείο, κατά ποσότητα $Q_{w_{\Delta n}}$

Για να υπολογιστεί κάθε συντελεστής απόκρισης της εξίσωσης 6.85, η προσομοίωση του υπόγειου προβλήματος πραγματοποιείται για $N+1$ φορές. Κατά την πρώτη προσομοίωση, που ονομάζεται προσομοίωση βασικής κατάστασης (base-condition run), το υδραυλικό φορτίο υπολογίζεται σε κάθε θέση περιορισμού για κάθε περίοδο άντλησης με βάση το σύνολο των αρχικών τιμών βάσης (που είναι $h_{i,j,k,t}^0(Q_{w^0})$). Σε κάθε μία από τις επόμενες N προσομοιώσεις, το υδραυλικό φορτίο σε κάθε θέση περιορισμού υπολογίζεται με βάση την αλλαγή (διαταραχή) που υπέστη η τιμή άντλησης ή εμπλουτισμού για τη n-οστή μεταβλητή απόφασης παροχής. Για κάθε μία από αυτές τις προσομοιώσεις, η τιμές άντλησης ή εμπλουτισμού των υπολοίπων $N-1$ θέσεων διατηρείται στην αρχική τιμή βάσης. Από τις N προσομοιώσεις και τους συνακόλουθους υπολογισμούς των συντελεστών απόκρισης προκύπτει ένα μητρώο με συντελεστές απόκρισης που λύνει το πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Η τιμή διαταραχής (perturbation value) $Q_{w_{\Delta n}}$ υπολογίζεται από την σχέση:

$$Q_{w_{\Delta n}} = \delta^0 Q_{w_n}'' \quad (6.86)$$

όπου:

- δ^0 , η μεταβλητή διαταραχής που καθορίζει ο χρήστης

- Qw_n'' , το προκαθορισμένο άνω όριο της τιμής άντλησης ή εμπλουτισμού στη n θέση πηγαδιού

Η μεταβλητή δ^0 μπορεί να είναι θετική ή αρνητική: μια αρνητική τιμή δηλώνει αύξηση στην παροχή $Qw_{\Delta n}$ (σχήμα των εμπρός διαφορών), ενώ μια αρνητική τιμή υποδηλώνει μία μείωση στην παροχή $Qw_{\Delta n}$ (σχήμα των πίσω διαφορών).

Όπως περιγράφηκε και παραπάνω, ο υπολογισμός των συντελεστών απόκρισης προϋποθέτει τη διενέργεια ενός τρεξίματος για να καθοριστούν οι τιμές βάσης των μεταβλητών και ενός επιπλέον τρεξίματος για κάθε μία από τις μεταβλητές διαταραχής των μεταβλητών απόφασης παροχής. Επειδή αυτά τα τρεξίματα γίνονται αυτόματα από το GWM, είναι σημαντικό τα τρεξίματα που παράγουν τα αρχεία εισόδου της επίλυσης της υπόγειας ροής να είναι σταθερά για ένα εύρος τιμών των μεταβλητών απόφασης παροχής. Αν η διαδικασία προσομοίωσης της ροής υπόκειται σε αποτυχία σύγκλισης, υπερβολική ξηρασία ή άλλες αστάθειες, τότε ίσως το GWM δεν καταφέρει να υπολογίσει με επιτυχία τους συντελεστές απόκρισης. Το GWM έχει μηχανισμούς για την αναπροσαρμογή της τιμής διαταραχής ώστε να μπορέσουν να ξεπεραστούν τα προβλήματα αστάθειας κατά την επίλυση της υπόγειας ροής. Για κάθε ένα από τα τρεξίματα της προσομοίωσης της ροής, το GWM διενεργεί ελέγχους για την επιτυχή ολοκλήρωση αυτής. Αν ένα τρέξιμο διαταραχής αποτύχει, τότε το GWM αλλάζει την τιμή διαταραχής σύμφωνα με έναν προκαθορισμένο από τον χρήστη παράγοντα και ξαναεκτελεί την προσομοίωση. Για μία μόνο μεταβλητή απόφασης παροχής, η αναπροσαρμογή της τιμής διαταραχής μπορεί να επαναλαμβάνεται συνέχεια μέχρι να επιτευχθεί ένα πετυχημένο τρέξιμο ή να φτάσει σε μία προκαθορισμένη από τον χρήστη μέγιστη τιμή.

Οι συντελεστές απόκρισης που παράγονται από την προσομοίωση της υπόγειας ροής από το MODFLOW είναι ο κρίσιμος σύνδεσμος μεταξύ της φυσικής του συστήματος υπόγειας ροής και των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου διαχείρισης υπόγειων υδάτων (δηλαδή το GWM). Συνεπώς, η ορθότητα (accuracy) και η ακρίβεια (precision) των συντελεστών απόκρισης παίζουν σημαντικό ρόλο στη λύση του προβλήματος διαχείρισης υπόγειων υδάτων. Η ορθότητα των συντελεστών απόκρισης – δηλαδή, η ικανότητά τους να απεικονίζουν την πραγματική απόκριση του υδροφορέα – εξαρτάται τουλάχιστον από δύο παράγοντες.

- Πρώτον, η ορθότητα (accuracy) των υδραυλικών φορτίων που υπολογίζονται από το MODFLOW για ένα συγκεκριμένο σύστημα υπόγειας ροής, είναι ένας πρώτος δείκτης ακρίβειας με τον οποίο το γεωλογικό πλαίσιο, οι υδραυλικές ιδιότητες, οι οριακές συνθήκες και άλλα χαρακτηριστικά του συστήματος ροής είναι γνωστά και απεικονίζονται στο μοντέλο. Προφανώς, η ορθότητα των συντελεστών απόκρισης αυξάνεται όσο το επίπεδο κατανόησης του συστήματος και της αναπαράστασής του βελτιώνεται.
- Το δεύτερο ζήτημα που επηρεάζει την ορθότητα των συντελεστών απόκρισης είναι η προσέγγιση της μερικής διαφορικής εξίσωσης της υπόγειας ροής από ένα σύνολο εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών. Η λύση των εξισώσεων των

πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιείται από το MODFLOW για να προσδιορίσει το υδραυλικό φορτίο σε κάθε κελί του μοντέλου δίνει μόνο προσεγγιστικές τιμές της πραγματικής κατανομής του υδραυλικού φορτίου στον υδροφόρο, όπως περιγράφεται και από τη μερική διαφορική εξίσωση της υπόγειας ροής. Το σφάλμα που παράγει αυτή η προσέγγιση είναι ανάλογο του μεγέθους των κελιών του πλέγματος (grid cells) που συνθέτουν την περιοχή μελέτης και του μεγέθους των χρονικών βημάτων (time steps) που επιλέγονται σε συνθήκες μεταβλητές στο χρόνο (transient conditions). Γενικώς, το σφάλμα προσέγγισης αυξάνεται όσο ο κάνναβος γίνεται πιο συμπαγής και τα χρονικά βήματα μεγαλύτερα. Οπότε το σφάλμα μπορεί να μειωθεί, μειώνοντας το μέγεθος των κελιών του καννάβου και (ή) μειώνοντας το μέγεθος των χρονικών βημάτων, ενέργειες όμως που θα αυξήσουν τον υπολογιστικό χρόνο.

Η ακρίβεια (precision) των συντελεστών απόκρισης είναι μία ένδειξη της ικανότητάς τους να απεικονίζουν την πραγματική επίδραση που δέχεται η υπολογιζόμενη κατάσταση του συστήματος στις αλλαγές των πιέσεων. Ένα μέτρο της ακρίβειας των συντελεστών απόκρισης είναι ο αριθμός των δεκαδικών τους ψηφίων. Η διατήρηση επαρκούς ακρίβειας στους συντελεστές απόκρισης είναι απαραίτητη για την επιτυχημένη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης από το πακέτο RMS. Ακόμα και αν η διαδικασία υπολογισμού της ροής δεν είναι ιδιαίτερα ορθή, είναι σημαντικό να διατηρείται η ακρίβεια του κάθε συντελεστή απόκρισης. Η ακρίβεια αυτή επηρεάζεται μερικώς από το μέγεθος των περιορισμών στις τιμές άντλησης και εμπλουτισμού (δηλαδή, το μέγεθος των κάθε $Q_{w_{\Delta n}}$) που χρησιμοποιούνται στην εξίσωση 6.85. Αν και οι συντελεστές απόκρισης για τα γραμμικά συστήματα που εξετάζονται εδώ είναι σταθεροί και οι τιμές τους είναι ανεξάρτητες από το μέγεθος των τιμών διαταραχής, η ακρίβειά τους και επομένως και η ακρίβεια της λύσης στο πρόβλημα διαχείρισης, εξαρτώνται από τον αριθμό των δεκαδικών ψηφίων που θα έχει κάθε πραγματικός αριθμός κατά τη διάρκεια του υπολογισμού του κάθε συντελεστή απόκρισης. Η σχέση μεταξύ του μεγέθους διαταραχής και της ακρίβειας του συντελεστή απόκρισης συνδέεται με το σφάλμα στρογγυλοποίησης όταν η διαφορά των υδραυλικών φορτίων λαμβάνεται στον αριθμητή της εξίσωσης 6.85. Εάν τα δύο υπολογισμένα υδραυλικά φορτία είναι πολύ κοντά στην τιμή, τότε μπορεί να χαθεί σημαντική ακρίβεια. Ακόμα πιο μεγάλη σημασία αποκτά το ζήτημα αυτό όταν εξετάζεται η χρήση διαταραχής στον υπολογισμό των συντελεστών απόκρισης για περιορισμούς που αφορούν διαφορά υδραυλικών φορτίων ή κλίσεων.

Οι περισσότερες μέθοδοι που είναι διαθέσιμες για την επίλυση των προβλημάτων ροής με τη χρήση των πεπερασμένων διαφορών είναι επαναληπτικές. Συνεχώς παράγονται τιμές υδραυλικών φορτίων μέχρι η μέγιστη αλλαγή στο φορτίο σε οποιοδήποτε κελί του μοντέλου να είναι μικρότερη από ένα συγκεκριμένο κριτήριο σύγκλισης μεταξύ των επαναλήψεων. Η ακρίβεια των υδραυλικών φορτίων που προκύπτουν μπορεί να εκτιμηθεί ότι θα είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτήν του κριτηρίου σύγκλισης. Οπότε, η ακρίβεια των συντελεστών απόκρισης εξαρτάται από το κριτήριο σύγκλισης που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια προσομοίωσης της ροής (flow process).

Υπάρχουν δύο τρόποι για να βελτιωθεί η ακρίβεια των παραγόμενων συντελεστών απόκρισης σε γραμμικά συστήματα:

- Ο πρώτος είναι να μειωθεί το φορτίο του κριτηρίου σύγκλισης του επαναληπτικού επιλυτή της προσομοίωσης της υπόγειας ροής, αν και κάτι τέτοιο θα μεγάλωνε τον υπολογιστικό χρόνο επίλυσης κάθε τρεξίματος που χρειάζεται η παραπάνω διαδικασία.
- Ο δεύτερος τρόπος, τον οποίο ακολουθεί και η εν λόγω έρευνα, είναι να χρησιμοποιηθούν σχετικά μεγαλύτερες τιμές διαταραχής για να εξασφαλισθούν μεγαλύτερες διαφορές στον αριθμητή της εξίσωσης 6.85 (Reifler και Ahlfeld, 1996). Προτείνονται τιμές διαταραχής μεγαλύτερες κατά 500% από τις αναμενόμενες σαν μια πρώτη εκτίμηση. Έτσι οι τιμές διαταραχής μπορεί να ποικίλουν σε ένα σύνολο προσομοιώσεων και έτσι να αξιολογηθεί πως επηρεάζονται οι διάφορες λύσεις στη διαχείριση (αν επηρεάζονται καθόλου) από το μέγεθος των διαταραχών στις τιμές των πιέσεων (stress-rate perturbations).

Ο αλγόριθμος Simplex

Η δημιουργία του μητρώου με τους συντελεστές απόκρισης από το πακέτο RMS ολοκληρώνει τη διαδικασία μετατροπής ενός προβλήματος διαχείρισης υπόγειων υδάτων σε μορφή που να μπορεί να επιλυθεί με τεχνικές γραμμικού προγραμματισμού. Η αναθεωρημένη σύνθεση του προβλήματος διαχείρισης των υπόγειων υδάτων αποτελείται από την αντικειμενική συνάρτηση (εξ. 6.83), υποκείμενη σε κάποιους περιορισμούς στους οποίους τα υδραυλικά φορτία έχουν ξαναδιατυπωθεί σε όρους μεταβλητών απόφασης παροχής (εξ. 6.84). Η αναδιατυπωμένη γραμμική εξίσωση μπορεί να εκφραστεί σε μία ισοδύναμη μορφή πίνακα ως

$$\text{Minimize } Z = c'x \quad (6.87)$$

υποκείμενη σε

$$Ax = b$$

$$0 \leq x \leq u$$

όπου:

- Z , η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης
- c' , η μεταφορά σε διάνυσμα στήλης (column vector) των συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης που συνδέονται με τις μεταβλητές απόφασης
- x , ένα διάνυσμα στήλης των μεταβλητών απόφασης με άνω όρια u
- A , το μητρώο των συντελεστών που περιλαμβάνει το μητρώο απόκρισης των υδραυλικών φορτίων

- b, ένα διάνυσμα στήλης του δεξιού μέλους των συντελεστών που συνδέονται με τους περιορισμούς.

Περιορισμοί που είχαν τη μορφή ανισοτήτων μετατράπηκαν σε ισότητες με την εισαγωγή νέων μεταβλητών (μεταβλητές απόκλισης, slack/surplus variables). Το πακέτο RMS επιλύει το πρόβλημα ελαχιστοποίησης που περιγράφεται από την εξίσωση 6.87. Για προβλήματα μεγιστοποίησης, το πακέτο πολλαπλασιάζει την αντικειμενική συνάρτηση ($c'x$) με το -1 . Το πακέτο RMS λύνει το πρόβλημα διαχείρισης των υπόγειων υδάτων με τη χρήση του αλγόριθμου simplex, χρησιμοποιώντας την επαναληπτική διαδικασία μέχρι να φτάσει στη βέλτιστη λύση x^* .

Το γραμμικό πρόβλημα της εξίσωσης 6.87 αντιπροσωπεύει ένα σύστημα n αγνώστων σε m εξισώσεις, όπου $n > m$. Η μέθοδος simplex προχωράει χτίζοντας $(n-m)$ μεταβλητές απόφασης και χρησιμοποιεί τους προς επίλυση περιορισμούς ισότητας για τις υπόλοιπες m μεταβλητές. Σε κάθε επανάληψη, οι μεταβλητές με τις νέες τιμές καλούνται μη βασικές μεταβλητές (nonbasic variables), x_N , ενώ οι υπόλοιπες m μεταβλητές ονομάζονται βασικές (basic variables), x_B . Μετά και τον καθορισμό των μητρών B και N σαν στήλες του A , που αντιστοιχούν στις βασικές και στις μη βασικές μεταβλητές, αντίστοιχα, το γραμμικό πρόβλημα της εξίσωσης 6.87 μπορεί να γραφτεί ως:

$$\text{Minimize } Z = c'_B x_B + c'_N x_N \quad (6.88)$$

υποκειμένη σε

$$Bx_B + Nx_N = b \quad (6.89)$$

$$0 \leq x_B \leq u_B \quad (6.90)$$

$$0 \leq x_N \leq u_N \quad (6.91)$$

όπου c_B , u_B και c_N , u_N είναι οι συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης και τα άνω όρια για τις βασικές και τις μη βασικές μεταβλητές, αντίστοιχα. Υποθέτοντας ότι η λίστα με τις βασικές μεταβλητές είναι γνωστή και ότι οι μη βασικές αντιστοιχήθηκαν σε συγκεκριμένες τιμές, τότε οι βασικές μεταβλητές καθορίζονται αναδιατυπώνοντας την εξίσωση 6.89:

$$x_B = B^{-1} (b - Nx_N) \quad (6.92)$$

Ακόμα, αντικαθιστώντας την εξίσωση 6.92 στην εξίσωση 6.88, και αναδιατάσσοντας, η αντικειμενική συνάρτηση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Minimize } Z = c'_B B^{-1} b + (c'_N + c'_B B^{-1} N) x_N \quad (6.93)$$

Οι κανόνες για τον προσδιορισμό του συνόλου των βασικών μεταβλητών και η ανάθεση τιμών στις μη βασικές μεταβλητές αποτελούν βασικό συστατικό της μεθόδου simplex. Η μέθοδος simplex προχωρά με την εύρεση μιας σειράς εφικτών λύσεων για το σύστημα των εξισώσεων ώσπου να βρει μια βέλτιστη λύση. Σε κάθε επανάληψη, οι μη βασικές μεταβλητές θεωρούνται σταθερές είτε στο άνω είτε στο κάτω τους όριο. Για να διασφαλιστεί η δυνατότητα αυτή, οι βασικές μεταβλητές υπολογίζονται από την εξίσωση 6.92. Η εξίσωση 6.93 χρησιμοποιείται για να ελέγξει αν η λύση είναι η

βέλτιστη. Αν αυτή δεν είναι, τότε μία νέα επανάληψη ξεκινά και μια βασική μεταβλητή γίνεται μη βασική και αντιστρόφως. Η μη βασική μεταβλητή που γίνεται βασική (δηλαδή εισάγεται στη βάση) επιλέγεται με βάση την επίδρασή της στην αντικειμενική συνάρτηση. Η αντικειμενική συνάρτηση, όπως εκφράζεται στην εξίσωση 6.93, εμπεριέχει έναν όρο που εξαρτάται μόνο από το x_N και έναν σταθερό όρο. Ο συντελεστής του x_N ονομάζεται μειωμένο κόστος (reduced cost). Η μη βασική μεταβλητή, που θα έχει την πιο ευνοϊκή επίδραση στην αντικειμενική συνάρτηση, δηλαδή το καλύτερο μειωμένο κόστος, επιλέγεται σαν εισερχόμενη στη βάση. Η βασική μεταβλητή που φτάνει πρώτη το άνω ή κάτω όριο της όσο η μη βασική αλλάζει, αφήνει τη βάση, και γίνεται μη βασική.

Αν και η μέθοδος simplex είναι αξιόπιστη και σταθερή, μπορεί να προκύψουν περιπτώσεις όπου ο αλγόριθμος θα κινείται γύρω από διάφορα σημεία χωρίς να συγκλίνει. Τέτοιες περιπτώσεις είναι σπάνιες σε καλοδιατυπωμένα γραμμικά προβλήματα, αλλά για να αποφευχθούν, ο χρήστης πρέπει να ορίσει έναν μέγιστο αριθμό επαναλήψεων (iterations) που θα μπορεί να φτάσει ο αλγόριθμος (μεταβλητή εισόδου LPITMAX). Μία προτεινόμενη τιμή για την LPITMAX είναι δέκα φορές ο αριθμός των περιορισμών, αν και η εμπειρία δείχνει ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει σε αριθμό επαναλήψεων μικρότερο από δύο φορές τον αριθμό των λειτουργικών περιορισμών. (Ahlfeld and Mulligan, 2000). Οι λειτουργικοί περιορισμοί περιλαμβάνουν όλους εκείνους τους περιορισμούς που δεν είναι μόνο απλά όρια στις μεταβλητές απόφασης. Υπάρχουν 4 πιθανά αποτελέσματα στη λύση κάθε γραμμικού προβλήματος.

- Το πρώτο περιλαμβάνει μία ενιαία βέλτιστη λύση για τα στοιχεία του διανύσματος των μεταβλητών απόφασης x που να ελαχιστοποιεί (ή μεγιστοποιεί) την αντικειμενική συνάρτηση ικανοποιώντας ταυτόχρονα όλους τους περιορισμούς. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η λύση αποτελείται από ένα σύνολο βέλτιστων τιμών άντλησης και εμπλουτισμού για κάθε μεταβλητή απόφασης παροχής Q_{w_n} και από ένα σύνολο βέλτιστων παροχών για κάθε εξωτερική μεταβλητή Ex_m .
- Στο δεύτερο πιθανό αποτέλεσμα δεν υπάρχει ένα σύνολο από μεταβλητές απόφασης που να ικανοποιεί ταυτόχρονα όλους τους περιορισμούς. Σε αυτήν την περίπτωση η διατύπωση του προβλήματος λέγεται ότι είναι ανέφικτη.
- Το τρίτο αποτέλεσμα είναι εκείνο κατά το οποίο η διατύπωση του προβλήματος αποφασίζεται να μην περιέχει περιορισμούς και η βέλτιστη αντικειμενική συνάρτηση να τείνει θετικά ή αρνητικά στο άπειρο.
- Το τελευταίο πιθανό αποτέλεσμα περιλαμβάνει την περίπτωση όπου υπάρχουν πολλαπλές βέλτιστες λύσεις στο πρόβλημα, των οποίων οι μεταβλητές απόφασης θα είναι διαφορετικές και οι τιμές αντικειμενικής συνάρτησης θα είναι μοναδικές.

Οι Ahlfeld και Mulligan (2000) περιγράφουν κάποιες περιπτώσεις όπου εμφανίζονται τα τρία τελευταία αποτελέσματα σε προβλήματα διαχείρισης υπόγειων υδάτων, καθώς και τους τρόπους αποφυγής αυτών. Ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης της μεθόδου simplex στη λύση γραμμικών προγραμμάτων είναι ότι μπορεί να καθοριστεί εύκολα συγκεκριμένη πληροφορία για την ανάλυση ευαισθησίας, αξιοποιώντας την πληροφορία στην τελευταία επανάληψη του αλγόριθμου. Οι πληροφορίες αυτές περιλαμβάνουν την ευαισθησία της βέλτιστης λύσης στους συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης και στις τιμές των περιορισμών που βρίσκονται στα δεξιά μέλη τους. Η ανάλυση ευαισθησίας τίθεται σε εφαρμογή στο GWM για γραμμικά προβλήματα και καταγράφεται μαζί με τη βέλτιστη λύση.

Μη γραμμικά προβλήματα

Μη γραμμικότητες μπορεί να προκύψουν έμμεσα στο πρόβλημα διαχείρισης των υπογείων υδάτων σαν αποτέλεσμα των δύο κοινών χαρακτηριστικών που έχουν τα μοντέλα υπόγειας ροής. Το πρώτο είναι η παρουσία των στρωμάτων (layers) στα οποία η μεταδοτικότητα (transmissivity) είναι συνάρτηση του υδραυλικού φορτίου. Οι συνθήκες που επικρατούν στον υδροφόρο ορίζοντα προκαλούν μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ της θέσης του υδροφόρου ορίζοντα και των πιέσεων άντλησης ή εμπλουτισμού (withdrawal or injection stresses). Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι η παρουσία οριακών συνθηκών που εξαρτώνται από το υδραυλικό φορτίο όπως τα ρέματα (streams), τα στραγγιστήρια (drains), η εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration) κ.ο.κ. Αυτές οι οριακές συνθήκες μπορούν να δημιουργήσουν μη γραμμικές συσχετίσεις μεταξύ των υπόγειων υδραυλικών φορτίων και των παροχών από ή προς τα προσομοιούμενα όρια. Και άλλα πακέτα της διαδικασίας GWF μπορούν να προκαλέσουν μη-γραμμικές αποκρίσεις.

Το πακέτο RMS παρέχει μία προσεγγιστική λύση σχεδιασμένη για την αντιμετώπιση πολλών εκ των μη-γραμμικών χαρακτηριστικών που μπορεί να προκύψουν σε προβλήματα διαχείρισης υπόγειων υδάτων. Για την περιγραφή αυτής της προσέγγισης, θα ληφθεί υπόψη μόνο ένα μέρος του συνολικού προβλήματος διαχείρισης. Δηλαδή αποκλείονται οι δυαδικές μεταβλητές και το πρόβλημα θα αποτελείται από την αντικειμενική συνάρτηση της εξίσωσης 6.83 υποκειμένη στους περιορισμούς που παρουσιάστηκαν. Η προσέγγιση για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων βασίζεται στον αλγόριθμο σειριακού γραμμικού προγραμματισμού (SLP) και αναφέρεται ως προσέγγιση SLP. Βασίζεται στις επαναλαμβανόμενες γραμμικοποιήσεις των μη γραμμικών χαρακτηριστικών του προβλήματος διαχείρισης και υλοποιείται με επανυπολογισμό του μητρώου απόκρισης για κάθε διαδοχικό γραμμικό πρόγραμμα. Το ανάπτυγμα πρώτης τάξεως της σειράς Taylor για το υδραυλικό φορτίο που δίνεται από την εξίσωση 6.84, υποτίθεται ότι είναι ακριβές για κάθε διαδοχικό γραμμικό πρόγραμμα, αλλά σε αντίθεση με τη γραμμική περίπτωση, ο συντελεστής των παροχών βάσης αλλάζει σε κάθε επανάληψη. Το υδραυλικό φορτίο σε κάθε θέση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$h_{i,j,k,t}(Qw) = h_{i,j,k,t}^v(Qw^v) + \sum_{n=1}^N \frac{\partial h_{i,j,k,t}^v}{\partial Qw_n^v}(Qw^v)(Qw_n - Qw_n^v) \quad (6.94)$$

όπου ο εκθέτης v είναι ένα επίπεδο επανάληψης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το υδραυλικό φορτίο $h_{i,j,k,t}^v$ όταν εφαρμόζεται το σύνολο των παροχών άντλησης και εμπλουτισμού Qw^v . Για τιμές των Qw που είναι κοντά στις Qw^v , το σφάλμα προσέγγισης είναι μικρό, και οι τιμές των $h_{i,j,k,t}$ που προκύπτουν από την εξίσωση είναι σχετικά ακριβείς.

Οι μερικές παράγωγοι στην εξίσωση 6.94, $\frac{\partial h_{i,j,k,t}^v}{\partial Qw_n^v}$, είναι οι συντελεστές απόκρισης

που αφορούν την αντίδραση των υπόγειων υδραυλικών φορτίων στις πιέσεις που δέχονται σε κάθε θέση άντλησης ή εμπλουτισμού. Στην εξίσωση 6.94 οι όροι των υδραυλικών φορτίων αντικαθίστανται κάθε φορά από τιμές που ορίζονται από τους περιορισμούς. Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου SLP, κατασκευάζεται ένα γραμμικό πρόγραμμα με βάση την προσέγγιση πρώτης τάξης της σειράς Taylor και των αντίστοιχων συντελεστών απόκρισης, και το πρόβλημα λύνεται με τη μέθοδο simplex που περιγράφηκε προηγουμένως. Επειδή οι αποκρίσεις των υδραυλικών φορτίων μπορεί να είναι μη γραμμικές, οι συντελεστές απόκρισης της εξίσωσης 6.94, δεν μπορούν πλέον να είναι συνεχείς. Ως εκ τούτου, οι συντελεστές απόκρισης για τα υδραυλικά φορτία πρέπει να υπολογίζονται εκ νέου σε κάθε επανάληψη v . Ο υπολογισμός αυτός χρησιμοποιεί ένα νέο σύνολο παροχών της βασικής κατάστασης το οποίο προέρχεται από τις βέλτιστες παροχές που προκύπτουν από την επίλυση του γραμμικού προγράμματος κατά την προηγούμενη επανάληψη.

Η διαδοχική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθούν δύο κριτήρια σύγκλισης. Το πρώτο προϋποθέτει ότι η μεταβολή στις τιμές των μεταβλητών παροχής μεταξύ της προηγούμενης και της τρέχουσας επανάληψης δεν θα είναι μικρότερη από μία τάξη μεγέθους των μεταβλητών παροχής στην τρέχουσα επανάληψη:

$$\|Qw^{v+1} - Qw^v\| \leq \varepsilon_1(1 + \|Qw^{v+1}\|) \quad (6.95)$$

Χρησιμοποιείται η νόρμα άπειρο (infinity norm) και η τιμή της ε_1 καθορίζεται από τον χρήστη. Να σημειωθεί ότι στο δεξιό μέλος της εξίσωσης 6.95 προστέθηκε στη νόρμα το 1. Ενώ είναι πιθανό στις περισσότερες περιπτώσεις η νόρμα των μεταβλητών απόφασης να είναι πολύ μεγαλύτερη του 1, μπορεί να υπάρξουν περιπτώσεις όπου θα είναι 0 ή κοντά στο 0. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η προσθήκη του 1 διασφαλίζει ότι χρησιμοποιείται ένα λογικό κριτήριο σύγκλισης. Η μεταβλητή εισόδου ε_1 μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα μέτρο που δείχνει τον αριθμό των σωστών στοιχείων που επιθυμούμε στη λύση. Για παράδειγμα, μία τιμή ίση με 10^{-5} δείχνει ότι η λύση θα είναι σωστή σε πέντε δεκαδικά ψηφία ή στην πέμπτη δεκαδική θέση, αν η νόρμα των μεταβλητών απόφασης είναι μικρότερη του 1 (Gill et al., 1981).

Το δεύτερο κριτήριο ορίζει ότι η μεταβολή στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, Z , θα είναι μικρότερη από μία τάξη μεγέθους της τιμής:

$$\|Z^{v+1} - Z^v\| \leq \varepsilon_2 (1 + \|Z^{v+1}\|) \quad (6.96)$$

Η τιμή της ε_2 καθορίζεται από τον χρήστη. Ο αλγόριθμος SLP συνοψίζεται ως εξής:

- Βήμα 0: Όρισε $v=0$ και Qw^0
- Βήμα 1: Υπολόγισε τους συντελεστές απόκρισης από τις τιμές βάσης Qw^v
- Βήμα 2: Συνόψισε και λύσε το γραμμικό πρόβλημα. Το σύνολο της λύσης εκχωρείται στις Qw^{v+1}
- Βήμα 3: Αν ικανοποιούνται τα κριτήρια σύγκλισης (εξ. 6.95 και 6.96), σταμάτα; αλλιώς,
- Βήμα 4: Όρισε $v=v+1$ και πήγαινε στο Βήμα 1.

Οι συντελεστές απόκρισης υπολογίζονται για κάθε v επανάληψη με μία εξίσωση εμπρός διαφορών παρόμοια με αυτήν της εξίσωσης 6.85. Για υδραυλικά φορτία, η εξίσωση αυτή γίνεται:

$$\frac{\partial h_{i,j,k,t}^v}{\partial Qw_n^v} \approx \frac{\Delta h_{i,j,k,t}^v}{\Delta Qw_n^v} = \frac{h_{i,j,k,t}^v(Qw_{\Delta n}^v) - h_{i,j,k,t}^v(Qw^v)}{Qw_{\Delta n}^v} \quad (6.97)$$

όπου:

$Qw_{\Delta n}^v$, είναι η τιμή διαταραχής για τη n μεταβλητή απόφασης παροχής και για τη v επανάληψη

$h_{i,j,k,t}^v(Qw_{\Delta n}^v)$, είναι το υδραυλικό φορτίο στην i, j, k θέση περιορισμού για την t περίοδο άντλησης που υπολογίστηκε από ένα σύνολο πιέσεων άντλησης και εμπλουτισμού $Qw_{\Delta n}^v$ που διαφέρει από το προηγούμενο σύνολο Qw^v μόνο ως προς το n στοιχείο, κατά ποσότητα $Qw_{\Delta n}^v$.

Κατά την πρώτη επανάληψη ($v=0$), οι συντελεστές απόκρισης υπολογίζονται βάσει ενός συνόλου τιμών άντλησης και εμπλουτισμού της βασικής κατάστασης και οι αρχικές τιμές διαταραχής $(Qw_{\Delta n})_{initial}$ ορίζονται από τον χρήστη με τον ίδιο τρόπο που ορίζονται και στα γραμμικά προβλήματα. Λόγω της μη-γραμμικότητας του προβλήματος και της ανάγκης για επίλυση με επαναλήψεις, οι προκαθορισμένες τιμές άντλησης και εμπλουτισμού της βασικής κατάστασης πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο κοντά σε αυτές της βέλτιστης λύσης. Τα ίδια θέματα που επηρεάζουν την ορθότητα και την ακρίβεια των συντελεστών απόκρισης στα γραμμικά προβλήματα, ισχύουν και για τα μη-γραμμικά. Ωστόσο, λόγω της μη γραμμικότητας των συστημάτων, ο χρήστης πρέπει να είναι προσεκτικός και να επιλέγει αρχικές τιμές διαταραχής αρκετά μικρές ώστε να διασφαλίσει ότι οι συντελεστές απόκρισης (των υδραυλικών φορτίων) που θα προκύψουν από τις εξισώσεις των εμπρός διαφορών θα είναι ακριβείς. Αν η τιμή διαταραχής είναι πολύ μεγάλη, τότε τα παράγωγα προσέγγισης μπορεί να είναι ελλιπή και έτσι να προκύψουν προβλήματα σύγκλισης κατά τη διαδικασία διαδοχικής γραμμικοποίησης. Με μικρές τιμές διαταραχής, τα υδραυλικά φορτία πρέπει να

υπολογίζονται με υψηλή ακρίβεια ώστε να διασφαλίζεται επαρκής ακρίβεια και στο μητρώο απόκρισης.

Λόγω της σημασίας που έχει η τιμή διαταραχής στην επιτυχία του αλγορίθμου SLP, παρέχονται πολλές δυνατότητες αυτόματης προσαρμογής της κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου. Σε κάθε επανάληψη, η τιμή διαταραχής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Qw^v_{\Delta n} = \delta^v Qw^u_n \quad (6.98)$$

όπου δ^v είναι η μεταβλητή διαταραχής για κάθε επανάληψη v και Qw^u_n είναι η προκαθορισμένη μέγιστη τιμή άντλησης ή εμπλουτισμού στη n θέση του πηγαδιού. Όπως περιγράφεται και για τα γραμμικά προβλήματα, η αρχική τιμή της μεταβλητής της διαταραχής ορίζεται ως δ^0 . Πρόσθετες μεταβλητές εισόδου είναι διαθέσιμες για να αλλάξουν την τιμή διαταραχής στις επόμενες επαναλήψεις. Ο ακόλουθος τύπος (Minihane, 2002) υπολογίζει την τιμή διαταραχής σε κάθε επανάληψη:

$$\delta^v = \frac{\delta_{initial} - \delta_{minimum}}{(\delta_{scale})^v} + \delta_{minimum} \quad (6.99)$$

όπου:

- v , το επίπεδο επανάληψης
- $\delta_{initial}$, μία αρχική μεταβλητή διαταραχής για τη n θέση του πηγαδιού
- $\delta_{minimum}$, η ελάχιστη μεταβλητή διαταραχής για τη n θέση του πηγαδιού
- δ_{scale} , ένας συντελεστής κλίμακας που καθορίζει το ρυθμό μείωσης της μεταβλητής της διαταραχής

Να σημειωθεί ότι ο εκθέτης της δ_{scale} δηλώνει ύψωση σε δύναμη, ώστε όταν η δ_{scale} τεθεί μεγαλύτερη του 1, η τιμή διαταραχής να μειώνεται όσο η επαναληπτική διαδικασία προχωράει και προσεγγίζει την ελάχιστη τιμή $\delta_{minimum}$.

Κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης του αλγορίθμου SLP, παράγεται ένα μητρώο απόκρισης. Όπως παρουσιάστηκε και παραπάνω είναι πιθανόν μία προσομοίωση της ροής να αποτύχει. Αν αποτύχει χρησιμοποιώντας τις διαταραγμένες τιμές πίεσης (perturbed stress rates), τότε η τιμή διαταραχής αλλάζει αυτόματα. Αυτό όμως δεν επηρεάζει την τιμή διαταραχής της επόμενης επανάληψης. Και αυτό γιατί στην αρχή κάθε επανάληψης, η δ^v υπολογίζεται από τις εξισώσεις 6.98 και 6.99 ανεξάρτητα από τις αλλαγές που μπορεί να έχουν γίνει στην τιμή διαταραχής της προηγούμενης επανάληψης. Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου SLP, οι συντελεστές απόκρισης υπολογίζονται κάθε φορά από ένα διαφορετικό σύνολο τιμών της βασικής κατάστασης. Αν η πρώτη βασική προσομοίωση ήταν επιτυχημένη αλλά μία επόμενη αποτύχει, τότε δίνεται η δυνατότητα της ρύθμισης του βασικού διανύσματος των μεταβλητών απόφασης της παροχής αντί του τερματισμού του αλγορίθμου. Αυτό επιτυγχάνεται με μία παράμετρο χαλάρωσης α , η οποία μετακινεί τη βασική λύση πιο κοντά στην

προηγούμενη (επιτυχημένη) βασική λύση. Για κάθε μία από τις μεταβλητές απόφασης της παροχής, υπολογίζεται μία προσωρινή βασική τιμή σύμφωνα με τη σχέση:

$$\widehat{Q}w_{\Delta n}^v = (1-a)\widehat{Q}w_n^v + a\widehat{Q}w_n^{v-1} \quad (6.100)$$

όπου $\widehat{Q}w_n$ είναι η προσωρινή τιμή της μεταβλητής απόφασης της παροχής. Η προσωρινή βασική λύση, η οποία αποτελείται από τιμές για κάθε μεταβλητή απόφασης της παροχής που έχει υπολογιστεί σύμφωνα με την εξίσωση 6.100, χρησιμοποιείται σε μία νέα απόπειρα εύρεσης μίας επιτυχημένης βασικής λύσης. Αν η προσομοίωση αποτύχει πάλι, μία νέα προσωρινή βασική λύση καθορίζεται αντικαθιστώντας την προηγούμενη $\widehat{Q}w_n^v$. Μία ακολουθία από εφαρμογές της εξίσωσης 6.100 οδηγεί σε μία ακολουθία από προσωρινές βασικές λύσεις που πλησιάζουν την προηγούμενη βασική λύση $\widehat{Q}w_n^{v-1}$.

6.6.3. Απαραίτητα αρχεία για την κατάστρωση ενός προβλήματος

Αρχεία εισόδου

Πριν από την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με το GWM, ο χρήστης πρέπει να έχει ήδη αναπτύξει ένα μοντέλο υπόγειας ροής της περιοχής μελέτης μέσω του MODFLOW. Υπενθυμίζεται ότι το GWM μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο με τις διαδικασίες Global και GWF. Δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τις διαδικασίες μεταφοράς υπόγειων υδάτων (Ground-Water Transport), παρατήρησης (Observation), ευαισθησίας (Sensitivity), ή εκτίμησης παραμέτρων (Parameter-Estimation). Αν ωστόσο τα αρχεία εισόδου της διαδικασίας GWF περιέχουν παραμέτρους που προσδιορίζονται στη διαδικασία εκτίμησης παραμέτρων (Parameter-Estimation Process) και τα αρχεία εισόδου της διαδικασίας Sensitivity περιλαμβάνονται στο αρχείο name, τότε οι τιμές αυτών των παραμέτρων θα ληφθούν υπόψη στη διαδικασία GWF. Η διαδικασία Global ελέγχει τη λειτουργία όλου του προγράμματος και δημιουργεί δομές δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από όλες τις διαδικασίες του MODFLOW. Το name είναι το μόνο αρχείο της Global Process που χρειάζεται να τροποποιηθεί για ένα τρέξιμο του GWM. Στη συνέχεια περιγράφονται λεπτομερώς αυτές οι τροποποιήσεις και τα απαραίτητα αρχεία:

- Name: Το αρχείο name περιέχει τα ονόματα των περισσότερων αρχείων εισόδου και εξόδου που χρησιμοποιεί το MODFLOW και αποφασίζει ποιες από τις επιλογές του θα είναι ενεργοποιημένες. Περιέχει μία καταγραφή πληροφοριών για κάθε αρχείο εισόδου και εξόδου (μία καταγραφή είναι μία γραμμή στο αρχείο). Κάθε γραμμή αποτελείται από τρεις μεταβλητές, οι οποίες διαβάζονται σε ελεύθερη μορφή. Το GWM χρησιμοποιεί και τα δύο αρχεία εξόδου GLOBAL και LIST. Οπότε, και τα δύο αυτά αρχεία πρέπει να υπάρχουν στο αρχείο name. Η καταγραφή του GLOBAL πρέπει να είναι η πρώτη εγγραφή χωρίς σχόλιο στο αρχείο και η εγγραφή του LIST η δεύτερη. Μια ακόμα γραμμή πρέπει να εισαχθεί για να δείξει ότι η διαδικασία GWM είναι ενεργή. Η γραμμή πρέπει να διευκρινίσει το Ftype GWM. Το αρχείο που προσδιορίζεται

σε αυτήν την εγγραφή περιέχει όλη την πληροφορία που χρειάζεται το GWM για να τρέξει.

- **GWM:** Στα αρχεία εισόδου της διαδικασίας GWM περιλαμβάνονται το GWM file και αρκετά αρχεία υποστήριξης. Το αρχείο GWM χρησιμοποιείται για να ενεργοποιεί τη διαδικασία GWM και για να αναγνωρίζει τα αρχεία που θα ανοιχτούν για την εκτέλεση του GWM. Τέσσερα είδη πληροφοριών καταγράφονται στα αρχεία εισόδου (input files) για το πρόβλημα διαχείρισης: οι μεταβλητές απόφασης, η αντικειμενική συνάρτηση, οι περιορισμοί και οι παράμετροι ελέγχου των αποτελεσμάτων.
- **DECVAR:** Αυτό το αρχείο καθορίζει τις μεταβλητές απόφασης ενός προβλήματος διαχείρισης. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, όλες οι μεταβλητές απόφασης (παροχής και εξωτερικές) στο GWM αντιμετωπίζονται σαν θετικές τιμές, είτε αντιπροσωπεύουν άντληση, εμπλουτισμό, εξαγωγή, ή εισαγωγή νερού. Μία μεταβλητή απόφασης παροχής (flow-rate decision variable) καθορίζεται από την μεταβλητή εισόδου FTYPE στο αρχείο DECVAR μεταβλητών απόφασης: Αν η FTYPE είναι W, η μεταβλητή αφορά άντληση (withdrawal). Αν είναι I, η μεταβλητή αφορά εμπλουτισμό (injection). Επειδή ο χρήστης αποφασίζει κάθε φορά ποια μεταβλητή θα αναφέρεται σε άντληση και ποια σε εμπλουτισμό, το GWM θα γνωρίζει πως να αντιμετωπίσει εσωτερικά την κάθε μεταβλητή απόφασης. Οπότε, όταν καθορίζονται η ελάχιστη ή μέγιστη τιμή παροχής σε μία θέση (μεταβλητές εισόδου FVMIN και FVMAX) και η παροχή αναφοράς για τη μεταβλητή (μεταβλητή εισόδου FVREF), θα πρέπει να χρησιμοποιούνται τιμές μεγαλύτερες του 0 και για άντληση και για εμπλουτισμό. Υπάρχουν τρία είδη μεταβλητών απόφασης.
 - Το πρώτο είναι οι παροχές (είτε άντλησης είτε εμπλουτισμού) για κάθε θέση πηγαδιού που συμμετέχει στη διαχείριση (managed well site). Για κάθε θέση πηγαδιού μπορεί να έχουν καθοριστεί περισσότερες από μία παροχές σαν μεταβλητές απόφασης (flow-rate variables). Επιπροσθέτως, μία παροχή, σαν μεταβλητή απόφασης, μπορεί να εκτείνεται σε περισσότερα από ένα κελιά και μπορεί να είναι ενεργή σε περισσότερες από μία περιόδους άντλησης (stress periods).
 - Το δεύτερο είδος μεταβλητών απόφασης είναι οι εξωτερικές παροχές (external flow rates) που μπορεί να δηλώνουν εισαγόμενη ή εξαγόμενη ποσότητα νερού στο κύριο σύστημα του μοντέλου. Οι μεταβλητές αυτές δεν έχουν άμεση επίδραση στις μεταβλητές κατάσταση του συστήματος και δεν αναφέρονται σε κάποια συγκεκριμένη θέση μέσα στο μοντέλο.
 - Το τρίτο είδος μεταβλητών απόφασης είναι οι δυαδικές μεταβλητές (binary variables) που χρησιμοποιούνται για να ορίσουν την κατάσταση στην οποία βρίσκεται κάθε μεταβλητή απόφασης (παροχής ή εξωτερικής παροχής) ως ενεργή (για παράδειγμα, το εργοτάξιο έχει κατασκευαστεί) ή ανενεργή (το εργοτάξιο δεν έχει κατασκευαστεί). Οι δυαδικές μεταβλητές μπορούν να έχουν είτε την τιμή 0 (ανενεργή θέση) είτε την

τιμή 1 (ενεργή θέση). Μία ή περισσότερες μεταβλητές απόφασης (παροχής ή εξωτερικής παροχής) μπορούν να συνδεθούν με κάθε δυαδική μεταβλητή.

- **OBJFNC:** Σε αυτό το αρχείο καθορίζονται ο τύπος της αντικειμενικής συνάρτησης που θα επιλυθεί, καθώς και οι συντελεστές που σχετίζονται με κάθε μεταβλητή απόφασης. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι απαραίτητο να περιέχονται όλες οι μεταβλητές απόφασης στην αντικειμενική συνάρτηση. Με άλλα λόγια, κάποιες συνθέσεις διαχείρισης θα έχουν αντικειμενικές συναρτήσεις που δεν θα εμπεριέχουν όλες τις μεταβλητές απόφασης του προβλήματος. Κατά τον προσδιορισμό των συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης, για τις μεταβλητές απόφασης με μεταβλητές εισόδου FVOBJC, EVOBJC και BVOBJC, ο χρήστης πρέπει να προσδιορίσει το πρόσημο κάθε συντελεστή ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να πάρει την επιθυμητή μορφή. Για παράδειγμα, αν η αντικειμενική έχει στόχο να μεγιστοποιήσει το οικονομικό όφελος από την άντληση ή την εισαγωγή νερού από μία λεκάνη, και το όφελος είναι 1\$ ανά μονάδα νερού που αντλείται σε μία συγκεκριμένη θέση αλλά το κόστος εισαγωγής από μία εξωτερική μεταβλητή είναι 1\$ ανά μονάδα εισαγωγής, τότε ο χρήστης πρέπει να καθορίσει έναν θετικό συντελεστή για την άντληση και έναν αρνητικό για την εξωτερική μεταβλητή.
- **VARCON:** Χρησιμοποιείται για να θέσει τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης που αφορούν παροχή και εξωτερική παροχή, καθώς και τις παροχές αναφοράς που θα χρησιμοποιήσει το GWM κατά την πρώτη εκτέλεσή του. Θα πρέπει να υπάρχουν καταγραφές για όλες τις μεταβλητές απόφασης που καθορίστηκαν στο αρχείο DECVAR. Δύο προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τα κατώτατα όρια για τις μεταβλητές απόφασης παροχής και για τις εξωτερικές μεταβλητές απόφασης, ανάλογα με το αν οι μεταβλητές απόφασης έχουν συσχετιστεί με δυαδικές μεταβλητές.
 - Εάν μια μεταβλητή απόφασης παροχής ή μία εξωτερική μεταβλητή απόφασης έχει συνδεθεί με μια δυαδική μεταβλητή, τότε μπορούν να οριστούν μη μηδενικά κατώτερα όρια στο αρχείο των περιορισμών.
 - Αν μία μεταβλητή απόφασης, είτε παροχής είτε εξωτερική, δεν έχει συνδεθεί με κάποια δυαδική μεταβλητή, τότε το κατώτερο όριο της μεταβλητής πρέπει να οριστεί ίσο με 0. Ωστόσο σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει ένα μη μηδενικό κατώτερο όριο με τη χρήση των γραμμικά αθροιστικών περιορισμών.
- **HEDCON:** Στο αρχείο αυτό καθορίζονται οι περιορισμοί για τα υδραυλικά φορτία στα κελιά του μοντέλου. Σε αυτούς περιλαμβάνονται οι περιορισμοί στις ανώτερες και κατώτερες τιμές των υδραυλικών φορτίων (head-bound constraints), οι περιορισμοί στην πτώση του υδραυλικού φορτίου (drawdowns), οι περιορισμοί στη διαφορά του υδραυλικού φορτίου μεταξύ δύο διαφορετικών κελιών του μοντέλου (head differences), και οι περιορισμοί στην κλίση του υδραυλικού φορτίου μεταξύ δύο κελιών του μοντέλου (gradients).

- SOLN:** Καθορίζει πολλές μεταβλητές που ελέγχουν τον αλγόριθμο λύσης του προβλήματος βελτιστοποίησης και τον τύπο και την ποσότητα των αποτελεσμάτων που καταγράφονται στα αρχεία αποτελεσμάτων (output files). Οι πρώτες από αυτές τις μεταβλητές είναι οι μεταβλητές διαταραχής (perturbation variables), όπου η δ^0 είναι για γραμμικά προβλήματα και οι $\delta_{initial}$, $\delta_{minimum}$ και δ_{scale} για μη γραμμικά προβλήματα. Για γραμμικές συνθέσεις πρέπει να οριστεί η μεταβλητή δ^0 στην εξίσωση 6.86. Η μεταβλητή αυτή μπορεί να έχει μία θετική ή μία αρνητική τιμή: μια θετική τιμή σημαίνει αύξηση στην παροχή (αναφέρεται σαν υπολογισμός των εμπρός διαφορών), ενώ μία αρνητική σημαίνει μείωση στην παροχή (αναφέρεται σαν υπολογισμός των πίσω διαφορών). Επιπρόσθετα, δεν περιορίζεται ανάμεσα στις τιμές +1.0 και -1.0. Ο χρήστης ίσως χρειαστεί να πειραματιστεί με διάφορες τιμές της μεταβλητής σε ένα σύνολο από εκτελέσεις του GWM ώστε να μπορέσει να βρει την πιο κατάλληλη τιμή που ταιριάζει στο εκάστοτε πρόβλημα. Αν ο χρήστης επιλέξει στο αρχείο SOLN τον τύπο λύσης SLP (δηλαδή, επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης με διαδοχικό γραμμικό προγραμματισμό), τότε οι τρεις μεταβλητές διαταραχής $\delta_{initial}$, $\delta_{minimum}$ και δ_{scale} της εξίσωσης 6.99 πρέπει να οριστούν από μεταβλητές εισόδου. Η επιλογή της $\delta_{initial}$ ακολουθεί την ίδια λογική όπως η επιλογή της δ^0 στη γραμμική περίπτωση. Η τιμή της $\delta_{minimum}$ πρέπει να επιλέγεται τέτοια ώστε η τελική τιμή διαταραχής να είναι αρκετά μεγάλη για να παραγάγει αρκετά δεκαδικά ψηφία στο μητρώο απόκρισης, και αρκετά μικρή για να διασφαλίσει μία ακριβή προσέγγιση για τη μη-γραμμική απόκριση. Μία αρχική εκτίμηση που προτείνεται για τη $\delta_{minimum}$ είναι 0.5% της τιμής της αναμενόμενης βέλτιστης λύσης. Ο συντελεστής κλιμάκωσης δ_{scale} κανονικά ορίζεται να είναι μεγαλύτερος του 1.0, έτσι ώστε η παράμετρος διαταραχής να μειώνεται καθώς αυξάνονται οι επαναλήψεις. Μία τιμή ίση με 5.0 έχει αποδειχθεί ότι δίνει καλά αποτελέσματα. (Minihane, 2002). Όπως και με την επιλογή της δ^0 , έτσι και εδώ ο χρήστης μπορεί να χρειαστεί να πειραματιστεί με διάφορες τιμές των $\delta_{initial}$, $\delta_{minimum}$ και δ_{scale} μέχρι να προσδιορίσει ποιές ταιριάζουν καλύτερα στο πρόβλημα. Όλων των ειδών οι λύσεις απαιτούν για κάθε μεταβλητή απόφασης παροχής τον ορισμό ενός μέγιστου ορίου στην παροχή άντλησης ή εμπλουτισμού (μεταβλητή Qw_n^u) ώστε να υπολογιστούν οι τιμές διαταραχής $Qw_{\Delta n}$ ή Qw_n^v . Οι μέγιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης παροχής ορίζονται στο αρχείο VARCON. Όλων των ειδών οι λύσεις απαιτούν επίσης για κάθε μεταβλητή απόφασης παροχής τη διευκρίνιση εκείνων των παροχών άντλησης ή εμπλουτισμού που αποτελούν τις τιμές βάσης και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των συντελεστών απόκρισης (δηλαδή, τις Qw^0). Για λόγους ευκολίας υπάρχουν δύο επιλογές για τον καθορισμό των Qw^0 .

Οι χρήστες του GWM πρέπει να δίνουν μεγάλη προσοχή στην ακρίβεια του μητρώου με τους συντελεστές απόκρισης. Ένα βοηθητικό εργαλείο αξιολόγησης της ακρίβειας του μητρώου των συντελεστών απόκρισης περιλαμβάνεται στα αποτελέσματα του

GWM και είναι ο μέσος αριθμός των δεκαδικών ψηφίων του μητρώου. Ο αριθμός των δεκαδικών ψηφίων εκτιμάται διαιρώντας την αλλαγή που προκαλείται στο σύστημα από τη διαταραχή, με το κριτήριο σύγκλισης του υδραυλικού φορτίου (head-convergence criterion) που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία ροής. Από το λόγο που προκύπτει ο αριθμός των ψηφίων αριστερά της υποδιαστολής χρησιμοποιείται σαν μέτρο του αριθμού των δεκαδικών ψηφίων. Αυτός ο λόγος υπολογίζεται από τη μεταβλητή HCLOSE της διαδικασίας GWF για να αναπαριστά το κριτήριο σύγκλισης του υδραυλικού φορτίου. Για να έχει νόημα αυτός ο λόγος, πρέπει να καθοριστεί καταλλήλως. Όταν χρησιμοποιούνται διάφορα πακέτα επίλυσης της διαδικασίας της ροής όπως το PCG (Preconditioned Conjugate-Gradient) ή το DE4 (Direct Solver), ο χρήστης πρέπει να διασφαλίζει ότι η τιμή τη μεταβλητής HCLOSE έχει ουσιαστική αξία.

Επειδή τα υδραυλικά φορτία θα τείνουν να μεταβάλλονται ελάχιστα κατά τη διάρκεια άντλησης από μεταβλητές απόφασης παροχής που βρίσκονται μακριά, οι αντίστοιχοι συντελεστές απόκρισης θα είναι μικροί και ίσως έχουν χαμηλή ακρίβεια. Όσο άλλες μεταβλητές απόφασης παροχής παράγουν σημαντικές αποκρίσεις, το μητρώο απόκρισης θα είναι επαρκώς ακριβές για να επιτύχει λύση. Το πακέτο RMS ελέγχει κάθε στήλη του παραγόμενου μητρώου απόκρισης. Πρέπει τουλάχιστον ένας συντελεστής απόκρισης κάθε στήλης να έχει επαρκή ακρίβεια για να προβλέψει μία ουσιαστική απόκριση. Με άλλα λόγια, κάθε μεταβλητή απόφασης πρέπει να έχει επαρκή αριθμητική επίδραση σε τουλάχιστον έναν περιορισμό. Ο έλεγχος αυτός διεξάγεται προϋποθέτοντας ότι ο αριθμός των δεκαδικών ψηφίων του λόγου που υπολογίζει η μεταβλητή HCLOSE, είναι μεγαλύτερος ή ίσος της μεταβλητής NSIGDIG που έχει καθορίσει ο χρήστης, για τουλάχιστον μία καταχώρηση της στήλης. Αν μία στήλη δεν ικανοποιεί αυτό τον έλεγχο, τότε το GWM μπορεί αυτόματα να την υπολογίσει πάλι με μία νέα τιμή διαταραχής (perturbation value). Η διαδικασία GWF μπορεί να αποτύχει κατά τη διάρκεια ενός βασικού τρεξίματος (base-condition run) ή σε ένα από τα τρεξίματα της διαταραχής (perturbation runs). Αυτό μπορεί να οφείλεται σε πολλούς λόγους, όπως ότι απέτυχε να συγκλίνει ο αλγόριθμος επίλυσης της διαδικασίας GWF, ή ότι περιλαμβάνεται σε ένα περιορισμό ένα κελί χωρίς υδραυλικό φορτίο, ή ότι το GWM εντοπίζει ότι η προσομοιωμένη τιμή διαταραχής είναι ανεπαρκής ή ανακριβής. Αν η διαδικασία ροής αποτύχει κατά τη διάρκεια ενός βασικού τρεξίματος για τους τύπους επίλυσης NS, MPS ή LP, τότε το πρόγραμμα θα τερματιστεί. Αυτό θα συμβεί αν οι τιμές βάσης των μεταβλητών απόφασης παροχής που έχουν δοθεί από το χρήστη δεν μπορέσουν να οδηγήσουν σε επιτυχημένη εκτέλεση του προγράμματος. Σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης πρέπει να τροποποιήσει τις πιέσεις της βασικής κατάστασης (base-condition stresses) και/ή τους παραμέτρους επίλυσης της διαδικασίας GWF ώστε να βελτιωθεί η σύγκλιση και/ή η σταθερότητα του μοντέλου. Ωστόσο για τον τύπο επίλυσης SLP, οι συντελεστές απόκρισης παράγονται από ένα διαφορετικό σύνολο αρχικών παροχών άντλησης και εμπλουτισμού για κάθε επανάληψη του αλγόριθμου SLP. Αυτός ο τύπος επίλυσης αφορά μη γραμμικές συνθήκες οι οποίες δεν εξετάζονται εδώ. Η διαδικασία της προσομοίωσης μπορεί επίσης να αποτύχει κατά τη διάρκεια ενός τρεξίματος όπου υπολογίζεται η διαταραχή.

Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω κακής επιλογής της τιμής διαταραχής. Σε αυτήν την περίπτωση το GWM μπορεί να ρυθμίσει αυτόματα την τιμή διαταραχής και να εκτελέσει ξανά τη διαδικασία ροής. Δύο είναι οι προκαθορισμένες από το χρήστη μεταβλητές εισόδου που ελέγχουν τη ρύθμιση της τιμής διαταραχής σε περίπτωση που αποτύχει η διαδικασία ροής. Η πρώτη παράμετρος, PGFACT, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0 και 1. Το GWM ανάλογα με τον τύπο του σφάλματος, είτε θα αυξήσει είτε θα μειώσει την τιμή διαταραχής. Μια προτεινόμενη τιμή της PGFACT είναι 0.5 η οποία αν χρησιμοποιηθεί θα οδηγήσει σε διπλασιασμό ή υποδιπλασιασμό της τιμής διαταραχής για κάθε διαδοχική προσπάθεια δημιουργίας της. Η τιμή διαταραχής για κάθε μεταβλητή απόφασης παροχής ρυθμίζεται ανεξάρτητα, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται από τις υπόλοιπες μεταβλητές. Η δεύτερη παράμετρος, NPGNMX, είναι ο μέγιστος αριθμός των προσπαθειών που γίνονται ώστε να ρυθμιστεί η τιμή διαταραχής για μια συγκεκριμένη μεταβλητή απόφασης. Αν ξεπεραστεί αυτή η τιμή για οποιαδήποτε μεταβλητή απόφασης, τότε ο αλγόριθμος θα τερματιστεί. Στις μη γραμμικές συνθήσεις όπου χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος SLP, ο αλγόριθμος simplex μπορεί να καθορίσει, για κάθε επανάληψη του SLP, εάν το γραμμικό πρόβλημα είναι ανέφικτο ή απερίοριστο. Αυτό δε σημαίνει απαραίτητα ότι το πραγματικό πρόβλημα είναι όντως ανέφικτο ή απερίοριστο. Αντίθετα, μπορεί να σημαίνει ότι το συγκεκριμένο σύνολο των συντελεστών απόκρισης που υπολογίστηκε παράγει για αυτή την επανάληψη, ένα ανέφικτο ή απερίοριστο σύνολο περιορισμών. Κατά τη διάρκεια μιας SLP επανάληψης, όταν ένα γραμμικό πρόγραμμα αποτύχει, το πακέτο RMS επαναλαμβάνει την επανάληψη, υπολογίζοντας τους συντελεστές απόκρισης με διαφορετική τιμή διαταραχής. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται πάνω από NINFMX φορές (το NINFMX καθορίζεται από τον χρήστη). Αν σε κανένα από τα NINFMX γραμμικά προβλήματα δεν βρεθεί λύση, τότε το πακέτο RMS συμπεραίνει ότι το αρχικό πρόβλημα είναι ανέφικτο ή απερίοριστο και ο αλγόριθμος τερματίζεται.

Αρχεία εξόδου

Δύο αρχεία εξόδου παράγονται μετά την εκτέλεση του GWM: ένα αρχείο GLOBAL και ένα αρχείο LIST. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να παραχθούν άλλα δύο επιπλέον αρχεία, ένα που θα περιέχει τα μητρώα απόκρισης και ένα που θα έχει τις διατυπώσεις των προβλημάτων σε μορφή MPS. Τα αρχεία GLOBAL και LIST χρησιμοποιούνται με έναν τρόπο που να είναι παρόμοιος με τη χρήση τους και από εφαρμογές του MODFLOW οι οποίες περιλαμβάνουν την εκτίμηση παραμέτρων και την ανάλυση ευαισθησίας. Τα περισσότερα από τα αποτελέσματα ενός συγκεκριμένου τρεξίματος του GWF βρίσκονται στο αρχείο LIST. Τα δεδομένα εισόδου που περιλαμβάνει το αρχείο LIST είναι η σειρά κατανομής των πληροφοριών, οι υδραυλικές ιδιότητες των προσομοιωμένων υδροφορέων και οι αρχικές και οριακές συνθήκες. Τα αποτελέσματα από τη διαδικασία GWF περιλαμβάνουν τα υπολογισμένα υδραυλικά φορτία, τις πτώσεις στάθμης και τους όρους ογκομετρικού προϋπολογισμού. Κάθε φορά που απαιτείται ένα νέο τρέξιμο του προγράμματος της υπόγειας ροής το αρχείο LIST διαγράφεται και δημιουργείται εκ νέου.

Το αρχείο GLOBAL περιέχει πληροφορίες που αφορούν το σύνολο ενός τρεξίματος του GWM. Οι πρώτες πληροφορίες που καταγράφονται περιέχουν τα ονόματα και τους τύπους των αρχείων του MODFLOW που ανοίγει το αρχείο NAME, τις πληροφορίες για τη χωρική και χρονική διακριτοποίηση του μοντέλου που διαβάζονται από το αρχείο διακριτοποίησης (DIS) του MODFLOW και τα δεδομένα εισόδου του επιλεγμένου πακέτου επίλυσης του MODFLOW. Το υπόλοιπο αρχείο GLOBAL αποτελείται από δεδομένα εισόδου, πληροφορίες και αποτελέσματα από την εκτέλεση του GWM. Το πρώτο μέρος της ενότητας που αφορά το GWM αποτελείται από δεδομένα τα οποία επαναλαμβάνονται από τα αρχεία εισόδου. Η ποσότητα των δεδομένων εισόδου που τυπώνεται εξαρτάται από την τιμή που έχει καθορίσει ο χρήστης στα αρχεία εισόδου του GWM. Επίσης τυπώνονται πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος του προβλήματος διαχείρισης, το οποίο αποτελείται από τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης και των περιορισμών.

Το επόμενο μέρος της ενότητας GWM (αλγόριθμος επίλυσης) παρέχει πληροφορίες για τη διαδικασία επίλυσης του προβλήματος διαχείρισης. Πρώτον, αναφέρονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας GWF για τη βασική εκτέλεση του προβλήματος, συμπεριλαμβάνοντας και την κατάσταση του κάθε περιορισμού. Η κατάσταση του κάθε περιορισμού αναφέρεται ως satisfied (ικανοποιείται), not met (δεν ικανοποιείται) και near-binding (σχεδόν δεσμευτικός). Το GWM θεωρεί έναν περιορισμό near-binding αν η αριστερή και η δεξιά πλευρά του περιορισμού συμφωνούν σε πέντε τουλάχιστον ψηφία. Στη συνέχεια παρέχονται πληροφορίες για την προσομοίωση της ροής που είναι απαραίτητες για να παραχθεί το μητρώο απόκρισης, συμπεριλαμβάνοντας τις τιμές διαταραχής που χρησιμοποιούνται σε κάθε υποψηφίο πηγάδι και πληροφορίες για τον αριθμό των δεκαδικών ψηφίων στο μητρώο απόκρισης. Αν το πρόβλημα δεν είναι γραμμικό ή περιλαμβάνονται σε αυτό δυαδικές μεταβλητές, τότε σε αυτό το σημείο θα έχουμε επιπλέον λεπτομερείς πληροφορίες για την πρόοδο των επαναλήψεων που είναι απαραίτητες για την επίλυση του προβλήματος. Αν το πρόβλημα περιέχει δυαδικές μεταβλητές, τότε στα αποτελέσματα θα έχουμε τη λύση του προβλήματος διαχείρισης που έχει υπολογιστεί για κάθε επανάληψη (υποπρόβλημα) του αλγόριθμου branch and bound. Οι λύσεις χαρακτηρίζονται ως relaxed (χαλαρή), current best solution (τρέχουσα καλύτερη λύση), feasible (εφικτή) και infeasible (ανέφικτη). Για κάθε λύση, αναφέρονται το όνομα της μεταβλητής απόφασης (είτε παροχής, είτε εξωτερικής) και η τιμή της για την τρέχουσα λύση, όπως και η κατάσταση της κάθε δυαδικής μεταβλητής.

Το τελευταίο μέρος της ενότητας GWM (Ground-Water Management Solution) παρέχει πληροφορίες σχετικά με την επίλυση του προβλήματος διαχείρισης, συμπεριλαμβανομένης της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, τις βέλτιστες τιμές για κάθε μία από τις μεταβλητές απόφασης, καθώς και τους δεσμευτικούς περιορισμούς. Αν και τα γραμμικά προγράμματα έχουν συχνά πολλούς περιορισμούς, μόνο ένα υποσύνολό τους τυπικά ελέγχει τη βέλτιστη λύση. Αυτοί οι περιορισμοί που περιορίζουν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης λέγεται ότι είναι δεσμευτικοί (binding constraints), επειδή εμποδίζουν τις μεταβλητές απόφασης να λάβουν τιμές που βελτιώνουν περαιτέρω την αντικειμενική συνάρτηση, και, ως εκ τούτου, δεσμεύουν τη λύση. Στη βέλτιστη λύση, οι περιορισμοί ανισότητας που ικανοποιούνται σαν ισότητες

είναι δεσμευτικές. Αντίθετα, μη δεσμευτικοί περιορισμοί (nonbinding constraints) δεν επηρεάζουν τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης και θα μπορούσαν να αφαιρεθούν από τη διατύπωση χωρίς να αλλάξει η λύση. Κάθε περιορισμός συνδέεται με μία τιμή που ονομάζεται shadow price (ή αλλιώς διπλή μεταβλητή) η οποία παρέχει πληροφορίες σχετικά με την επίδραση που έχουν μικρές μεταβολές στη τιμή του συντελεστή ο οποίος βρίσκεται στο δεξιό μέλος του περιορισμού, στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι shadow prices δείχνουν την οριακή αύξηση του οφέλους που προκύπτει από τη χαλάρωση κάθε συντελεστή του περιορισμού. Όταν η τιμή του δεσμευτικού περιορισμού που βρίσκεται στο δεξιό μέλος αυξηθεί κατά μία μονάδα, η αντικειμενική συνάρτηση θα μεταβληθεί κατά μία τιμή που δίνεται από τη shadow price. Αυτό σημαίνει ότι η βέλτιστη λύση είναι αρκετά ευαίσθητη σε περιορισμούς που έχουν υψηλές shadow prices. Αντιθέτως, μη δεσμευτικοί περιορισμοί έχουν μηδενικές shadow prices, καθώς μικρές μεταβολές των τιμών τους δεν έχουν καμία επίδραση στην αντικειμενική συνάρτηση. Οι τιμές shadow καταγράφονται μαζί με τη λίστα των δεσμευτικών περιορισμών στο αρχείο GLOBAL. Οι τιμές shadow δηλώνουν την τοπική ευαισθησία της βέλτιστης λύσης στο δεξιό μέλος των περιορισμών και είναι έγκυρες όσο οι μεταβολές στους περιορισμούς δεν αλλάζουν τη βάση της βέλτιστης λύσης. Για τα προβλήματα διαχείρισης που επιλύονται από το πακέτο RMS του GWM, η βάση αποτελείται από το σύνολο των μεταβλητών απόφασης (παροχής και εξωτερικών) που έχουν τιμές μεταξύ των μέγιστων και των ελάχιστων ορίων τους στη βέλτιστη λύση, καθώς και από ένα σύνολο μεταβλητών (slack variables) που συνδέονται με τους μη δεσμευτικούς περιορισμούς. Η ανάλυση εύρους (range analysis) χρησιμοποιείται για να καθορίσει το εύρος των τιμών μέσα στο οποίο η τιμή shadow είναι έγκυρη. Η ανάλυση εύρους παρατίθεται μετά τη λίστα με τους δεσμευτικούς περιορισμούς εφόσον η μεταβλητή εισόδου RANGE στο αρχείο SOLN έχει οριστεί 1. Αυτή η ανάλυση υπολογίζει το εύρος μέσα στο οποίο η τιμή στο δεξιό μέλος του περιορισμού μπορεί να ποικίλει χωρίς να μεταβάλλεται η βάση της βέλτιστης λύσης, εφόσον όλες οι άλλοι παράμετροι του μοντέλου διαχείρισης παραμένουν σταθερές. Η ανάλυση επίσης καθορίζει ποιες μεταβλητές απόφασης και/ή ποιοι περιορισμοί θα εισέρχονται και θα εξέρχονται από τη βάση, όταν η τιμή στο δεξιό μέλος αυξάνεται ή μειώνεται πέρα από το εύρος της.

Μια ανάλυση εύρους επί των συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης επίσης πραγματοποιείται και καταγράφεται, εφόσον το έχει ζητήσει ο χρήστης. Σε αυτήν την ανάλυση, καθορίζεται το εύρος μέσα στο οποίο οι συντελεστές μπορούν να ποικίλουν χωρίς να αλλάξει η βάση της βέλτιστης λύσης. Αν και η βέλτιστη βάση παραμένει αμετάβλητη, αν οι συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης παραμείνουν μέσα στα καθορισμένα εύρη τους, οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης και οι τιμές shadow σαν συναρτήσεις των συντελεστών, θα επηρεαστούν από τις μεταβολές. Ο συντελεστής της ανάλυσης εύρους καθορίζει επίσης ποιες μεταβλητές απόφασης και/ή ποιοι περιορισμοί θα εισέρχονται και θα εξέρχονται από τη βάση, όταν η τιμή στο δεξιό μέλος αυξάνεται ή μειώνεται πέρα από το εύρος της. Εκτός από τις πληροφορίες σχετικά με την ανάλυση εύρους, παρέχονται και τα απομειωμένα κόστη που συνδέονται με κάθε μεταβλητή απόφασης. Το μειωμένο κόστος (reduced cost) κάθε μεταβλητής απόφασης

που δεν είναι μέρος της βάσης της βέλτιστης λύσης (nonbasic variables) είναι η ποσότητα με την οποία θα χρεωθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης εφόσον αυτή η μεταβλητή γίνει βασική (basic variable). Για παράδειγμα, αν μία μη βασική μεταβλητή απόφασης έχει τιμή 0 και έπρεπε να τεθεί στη βέλτιστη λύση με μία μηδενική τιμή, η αντικειμενική συνάρτηση θα υποβαθμιζόταν - θα αυξανόταν για ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης και θα μειωνόταν για ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης - κατά μία ποσότητα ίση με το μειωμένο κόστος της μεταβλητής. Το κόστος αυτό για κάθε μεταβλητή απόφασης στη βέλτιστη βάση είναι 0.

Επειδή η ανάλυση εύρους προϋποθέτει συνεχείς μεταβλητές και γραμμικούς περιορισμούς, είναι απολύτως έγκυρη μόνο για γραμμικά και για χωρίς δυαδικές μεταβλητές προβλήματα. Μπορεί να είναι ικανοποιητικά ακριβής για προβλήματα με ήπια μη-γραμμικότητα. Αν υπάρχουν δυαδικές μεταβλητές, τότε η ανάλυση εύρους μπορεί να καταγραφεί. Ωστόσο, πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή. Η καταγεγραμμένη ανάλυση εύρους βασίζεται στο τελικό γραμμικό πρόγραμμα που λύνεται κατά τη διάρκεια του αλγόριθμου branch and bound και δεν περιλαμβάνει τις μεταβολές στις δυαδικές μεταβλητές οι οποίες μπορεί να προκληθούν όταν οι συντελεστές του δεξιού μέλους και οι συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης αλλάξουν. Η πιο ολοκληρωμένη ανάλυση εύρους, παρουσία των δυαδικών μεταβλητών, μπορεί να επιτευχθεί λύνοντας το πρόβλημα σαν να ήταν ένα μη δυαδικό-γραμμικό πρόβλημα απομακρύνοντας από αυτό τις ανενεργές μεταβλητές της ροής.

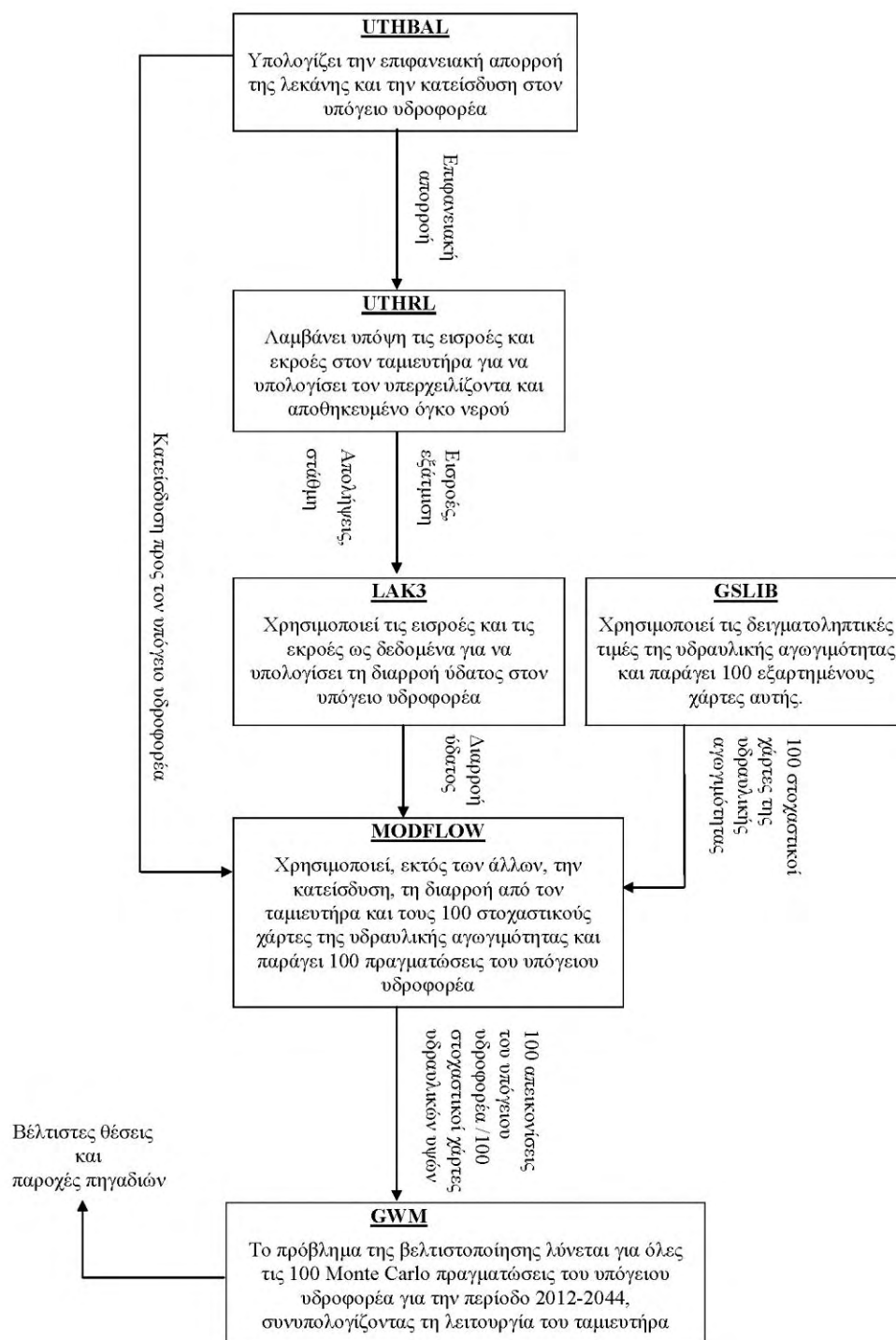
Το τελευταίο βήμα για μία επιτυχημένη εκτέλεση του GWM είναι μία τελευταία εκτέλεση της διαδικασίας GWF χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες παροχές που έχει καθορίσει ο αλγόριθμος επίλυσης. Χρησιμοποιώντας αυτές τις παροχές το αρχείο LIST θα περιέχει αποτελέσματα από τη διαδικασία GWF. Το αρχείο GLOBAL θα έχει την τελική κατάσταση των περιορισμών. Μία πετυχημένη εκτέλεση του προγράμματος θα πρέπει να αναφέρει ότι όλοι οι περιορισμοί έχουν ικανοποιηθεί (satisfied) ή είναι σχεδόν δεσμευτικοί (near-binding). Γίνεται διάκριση μεταξύ των δεσμευτικών περιορισμών και των σχεδόν δεσμευτικών περιορισμών. Κατά την επίλυση του γραμμικού προγράμματος, το οποίο περιέχει μια προσέγγιση στη διαδικασία GWF, ορισμένοι περιορισμοί θα είναι δεσμευτικοί, δηλαδή, θα ικανοποιούνται σαν αυστηρές ισότητες. Ωστόσο, όταν η διαδικασία GWF λειτουργεί με τις βέλτιστες παροχές, αυτοί οι ίδιοι περιορισμοί μπορεί να μην είναι ακριβώς δεσμευτικοί. Αυτό μπορεί να προκύψει από μη γραμμικές αποκρίσεις στη διαδικασία GWF και περιορισμούς στην ακρίβεια του υπολογισμού των υδραυλικών φορτίων. Επιπρόσθετα, μερικοί περιορισμοί που δεν είναι αυστηρά δεσμευτικοί στο γραμμικό πρόγραμμα, μπορεί να είναι σχεδόν δεσμευτικοί κατά τη διαδικασία GWF. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν διαφορές μεταξύ του συνόλου των περιορισμών που αναφέρονται σαν δεσμευτικοί (binding) στο γραμμικό πρόγραμμα και εκείνων που αναφέρονται σαν σχεδόν δεσμευτικοί (near-binding) στο τελικό αποτέλεσμα της GWF διαδικασίας.

6.7. Σύζευξη μοντέλων

Η σύζευξη των μοντέλων γίνεται μέσω της ανταλλαγής δεδομένων και αποτελεσμάτων. Με εξαίρεση το μοντέλο γεωστατιστικής προσέγγισης η ανταλλαγή αυτή πραγματοποιείται σε μηνιαία βάση μιας και η προσομοίωση έχει επιλεγθεί να γίνει σε μηνιαία βάση. Η παραγωγή των στοχαστικών πραγματώσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας από τη Γεωστατιστική Βιβλιοθήκη (GSLIB) είναι ανεξάρτητη του χρόνου. Η ανανέωσή του, δηλαδή η παραγωγή νέων στοχαστικών πραγματώσεων πραγματοποιείται μόνο κατά τη διαδικασία αποτίμησης της αξίας της πληροφορίας, είτε με τη λήψη της αναμενόμενης τιμής της K στην προ εκ των υστέρων φάση, είτε με τη λήψη της πραγματικής τιμής της K στην εκ των υστέρων φάση. Η ανανέωση αυτή, όμως δεν επηρεάζει το σύστημα των μοντέλων προσομοίωσης, αλλά μόνο το μοντέλο υπόγειας ροής, μιας και αποτελεί δικό του δεδομένο.

Η χρονική περίοδος σύζευξης των μοντέλων δεν είναι κοινή για όλα. Η περίοδος προσομοίωσης ξεκινά το 1987, αλλά ο ταμιευτήρας της Κάρλας τίθεται σε λειτουργία το 2012, όπως προέβλεπαν οι μελέτες και τότε ξεκινά και η περίοδος διαχείρισης του υπόγειου υδροφορέα με το πρόβλημα της βελτιστοποίησης και τη διαδικασία αποτίμησης της αξίας της πληροφορίας να τίθενται σε εφαρμογή, μέχρι το 2044. Γίνεται λοιπόν κατανοητό, πως εφόσον προ του 2012 δεν υφίσταται ταμιευτήρας τα UTHRL, LAK3 και GWM δε συμμετέχουν στο σύστημα. Το σύστημα μέχρι εκείνη την ημερομηνία ορόσημο αποτελείται από το UTHRL και το MODFLOW, το υπακούει στους στοχαστικούς χάρτες της K που έδωσε το GSLIB.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 6.13, παρουσιάζεται η σύζευξη των μοντέλων και τα δεδομένα που αυτά ανταλλάσσουν για την περίοδο διαχείρισης. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, το UTHBAL, στην ημικατανεμημένη μορφή του, υπολογίζει την επιφανειακή απορροή της λεκάνης απορροής και την κατείσδυση και δίνει την πρώτη στο UTHRL και τη δεύτερη στο MODFLOW, αντίστοιχα. Το UTHRL με τη σειρά του, λαμβάνοντας υπόψη τις εισροές και εκροές του ταμιευτήρα, δίνει τις εισροές, την εξάτμιση, τις απολήψεις στο LAK3, για να υπολογίσει τον όγκο του νερού που διαφεύγει προς τον υπόγειο υδροφορέα. Το UTHRL επίσης παρέχει και στο LAK3 τις προσομοιωμένες στάθμες που υπολόγισε, ώστε να τις χρησιμοποιήσει ως παρατηρούμενες για τη ρύθμισή του, μιας και στην πραγματικότητα δεν υπάρχουν παρατηρούμενες τιμές λόγω καθυστέρησης λειτουργίας του ταμιευτήρα. Το MODFLOW δέχεται την κατείσδυση από την επιφανειακή απορροή και τις διαφυγές του ταμιευτήρα, μεταξύ των άλλων δεδομένων που απαιτούνται. Δέχεται επίσης και τους 100 στοχαστικούς εξαρτημένους χάρτες της υδραυλικής αγωγιμότητας, οι οποίοι παρήχθησαν από το GSLIB. Το MODFLOW παράγει 100 αντίστοιχες στοχαστικές απεικονίσεις του υπόγειου υδροφορέα, δίνοντας ως σημαντικά αποτελέσματα χάρτες υδραυλικών υψών και υδατικά ισοζύγια. Τέλος το GWM λύνει το πρόβλημα βελτιστοποίησης για τις 100 απεικονίσεις του υπόγειου υδροφορέα, για τη διαχειριστική περίοδο 2012-2044 και δίνει τις βέλτιστες θέσεις και παροχές των πηγαδιών. Πάνω σε αυτές τις βέλτιστες λύσεις ασκείται η αξία της πληροφορίας. Περαιτέρω ανάλυση για κάθε μοντέλο, δίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 6. 13. Διάγραμμα σύζευξης των μοντέλων

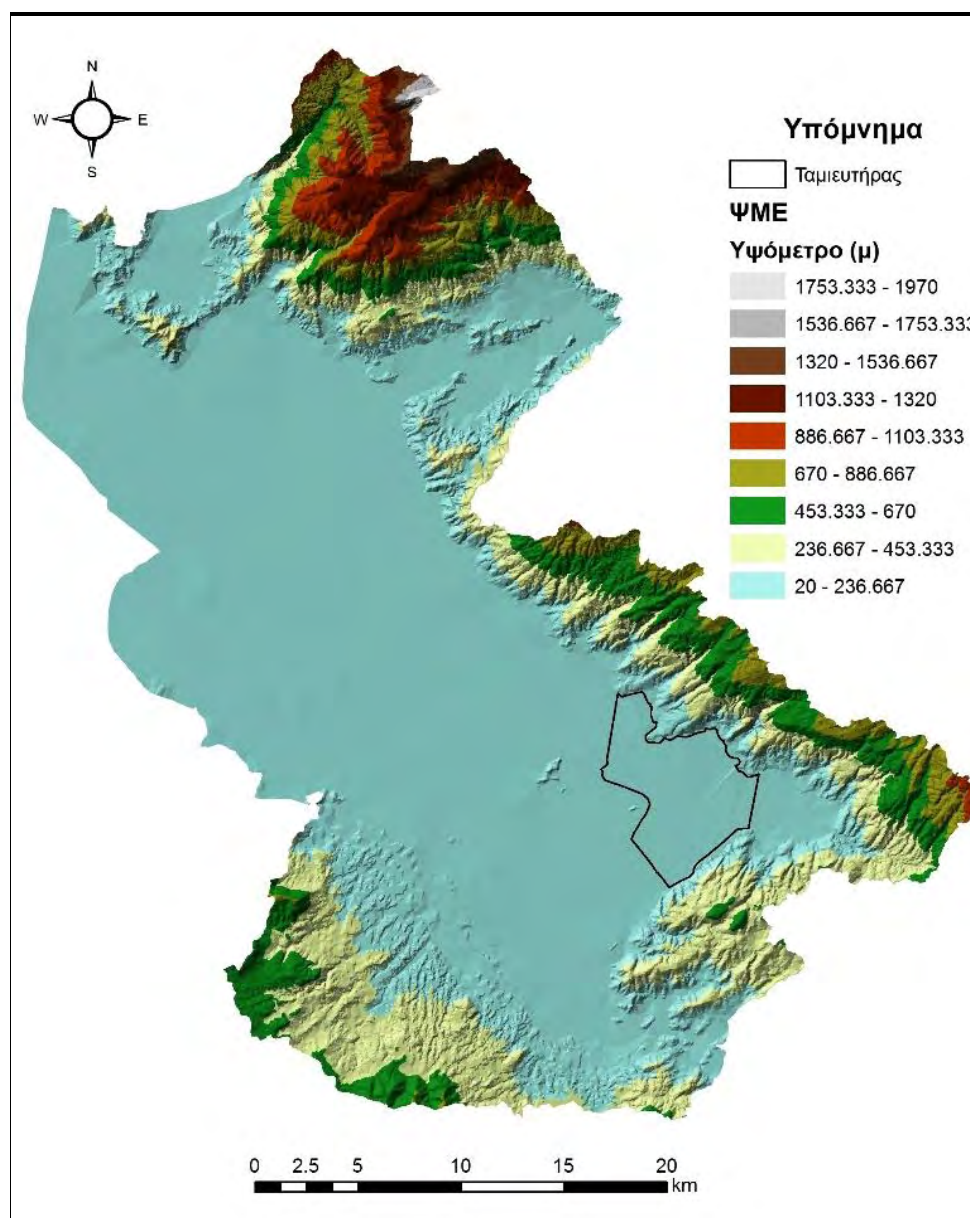
7. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΚΑΡΛΑΣ

7.1. Προσομοίωση επιφανειακής υδρολογίας

Το μηνιαίο υδρολογικό μοντέλο UTHBAL χρησιμοποιήθηκε για την ημικατανεμημένη μηνιαία προσομοίωση του υδρολογικού ισοζυγίου και την εκτίμηση της κατείσδυσης στον υπόγειο υδροφόρα της περιοχής μελέτης. Το μοντέλο χρησιμοποιεί χωρικά κατανεμημένα υδρομετεωρολογικά δεδομένα εισόδου σε υψομετρικές ζώνες σε περιβάλλον ενός Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών. Τα αποτελέσματα εξόδου του μοντέλου παρέχουν χωρικά ημικατανεμημένη πληροφορία των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου. Το μοντέλο εφαρμόστηκε στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κάρλας της Θεσσαλίας, το δυτικό όριο της οποίας επεκτάθηκε πέραν του Σ1, ώστε να συμπεριλάβει και τα όρια του υπόγειου υδροφόρα, έκτασης περίπου 1220 Km², ανάντι του σημείου εισόδου του νέου ταμιευτήρα. Επειδή όμως η έκταση που καταλαμβάνει ο υπόγειος υδροφόρας είναι σχεδόν η μισή λεκάνη, η υδρολογική λεκάνη χωρίστηκε σε δύο ομοιογενείς υψομετρικές ζώνες με βάση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής μελέτης. Η εκτίμηση του υδρολογικού ισοζυγίου και της κατείσδυσης στον υπόγειο υδροφόρα έγινε σε μηνιαία βάση για τη χρονική περίοδο Οκτώβριος 1960 έως Σεπτέμβριος 2009. Τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα για την υλοποίηση της εφαρμογής διακρίνονται σε γεωγραφικά και υδρομετεωρολογικά. Τα γεωγραφικά δεδομένα ήταν:

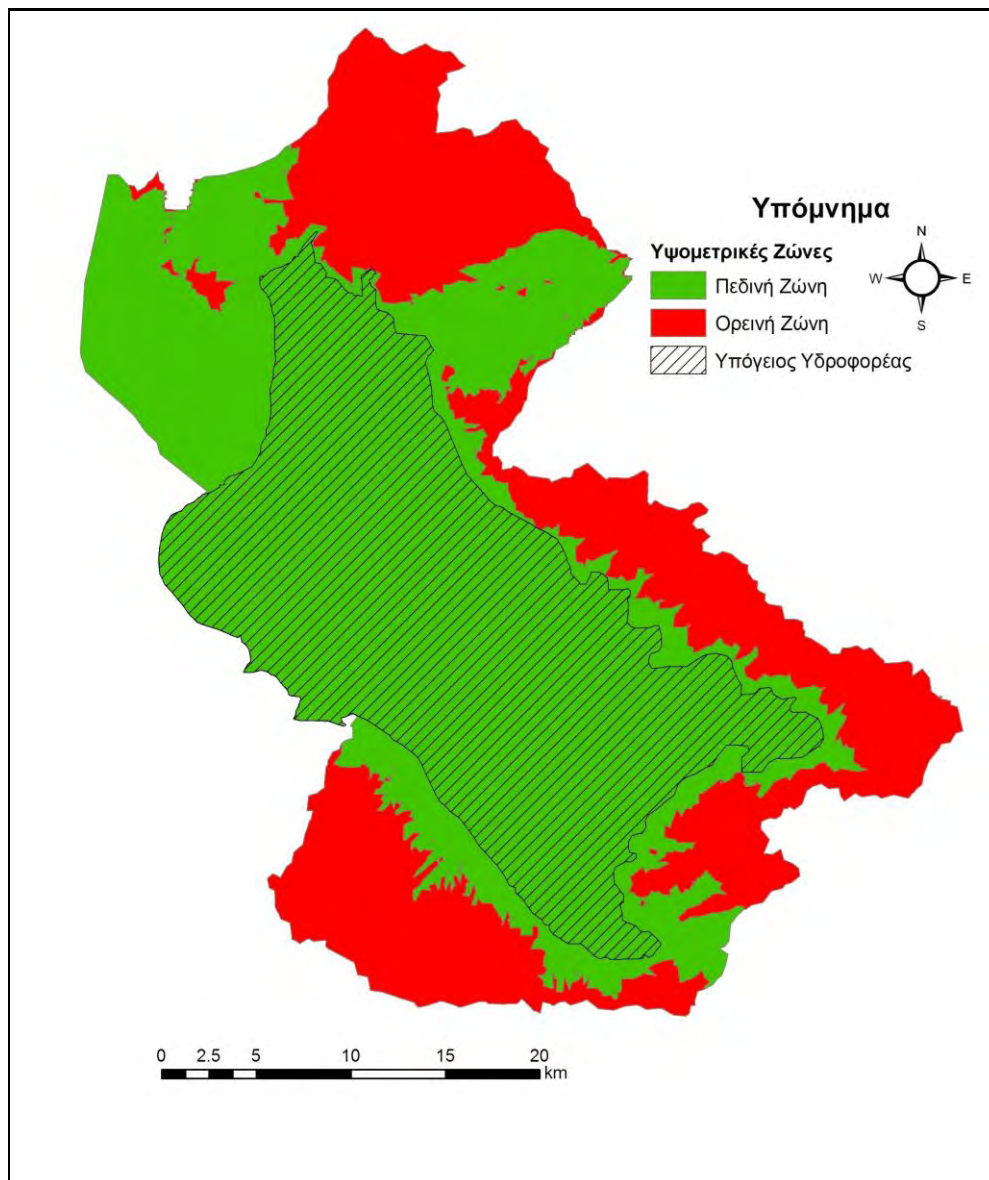
- το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Terrain Model, DTM) (Σχήμα 7.1), το οποίο δημιουργήθηκε από την ψηφιοποίηση των ισοϋψών καμπυλών από τοπογραφικούς χάρτες κλίμακας 1:50000,
- ο ψηφιακός χάρτης των γεωλογικών σχηματισμών που προήλθε από ψηφιοποίηση γεωλογικών χαρτών κλίμακας 1:50000,
- το υδρογραφικό δίκτυο που δημιουργήθηκε από την ψηφιοποίηση τοπογραφικών χαρτών,
- η ψηφιακή απεικόνιση χρήσεων γης κατά CORINE και
- οι θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών μέτρησης υετόπτωσης και θερμοκρασίας.

Τα υδρομετεωρολογικά δεδομένα περιλαμβάνουν τις μηνιαίες τιμές υετόπτωσης από 12 βροχομετρικούς σταθμούς (Σχήμα 7.5) της ευρύτερης περιοχής για την περίοδο Οκτώβριος 1960 έως Σεπτέμβριος 2002 (42 υδρολογικά έτη) και τιμές μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας από 26 μετεωρολογικούς σταθμούς για την ίδια περίοδο. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα μηνιαίας παροχής από τον υδρομετρικό σταθμό της λίμνης Κάρλας για τη βαθμονόμηση και την πιστοποίηση του υδρολογικού μοντέλου. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι υδρομετρικές παρατηρήσεις είναι μη συνεχόμενες με μεγάλα κενά ανάμεσα στις παρατηρήσεις.



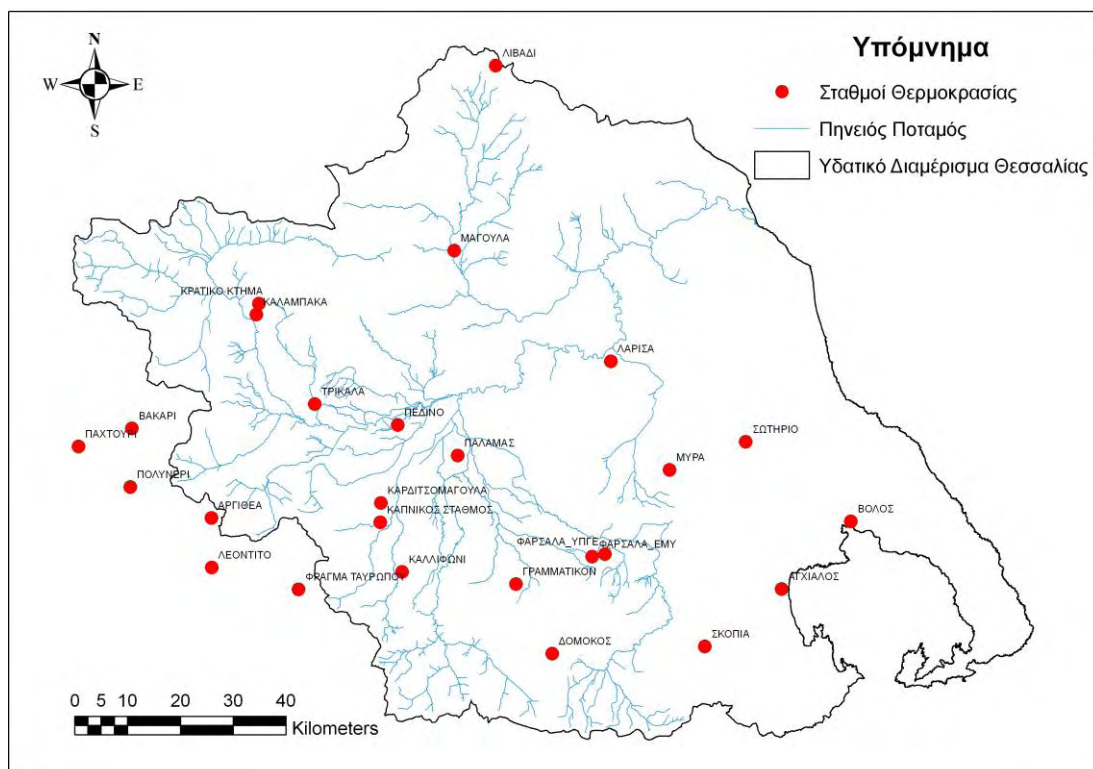
Σχήμα 7. 1. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ) λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας

Η υδρολογική λεκάνη της Κάρλας παρουσιάζει γεωμορφολογική ποικιλία με υψόμετρο που κυμαίνεται από 40 έως 1970 μέτρα και μέσο υψόμετρο περίπου 230 m. Για τον επιμερισμό της λεκάνης σε υψομετρικές ζώνες το ΨΜΕ χρησιμοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη και τις κλίσεις της περιοχής. Έτσι, επειδή το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης είναι πεδινό με πολύ μικρές κλίσεις και χαμηλό υψόμετρο, δύο υψομετρικές κλάσεις παρήχθησαν με βάση το υψόμετρο των 200 μέτρων. Στον χάρτη του Σχήματος 7.2 παρουσιάζονται οι δύο υψομετρικές ζώνες (υπολεκάνες) της λεκάνης απορροής της Κάρλας που είναι η ορεινή ζώνη (με υψόμετρο ≥ 200 m) και η πεδινή ζώνη (με υψόμετρο < 200 m). Επίσης απεικονίζεται και ο υπόγειος υδροφόρος της περιοχής μελέτης, ο οποίος βρίσκεται εξ ολοκλήρου στη χαμηλή υψομετρικά πεδινή ζώνη.

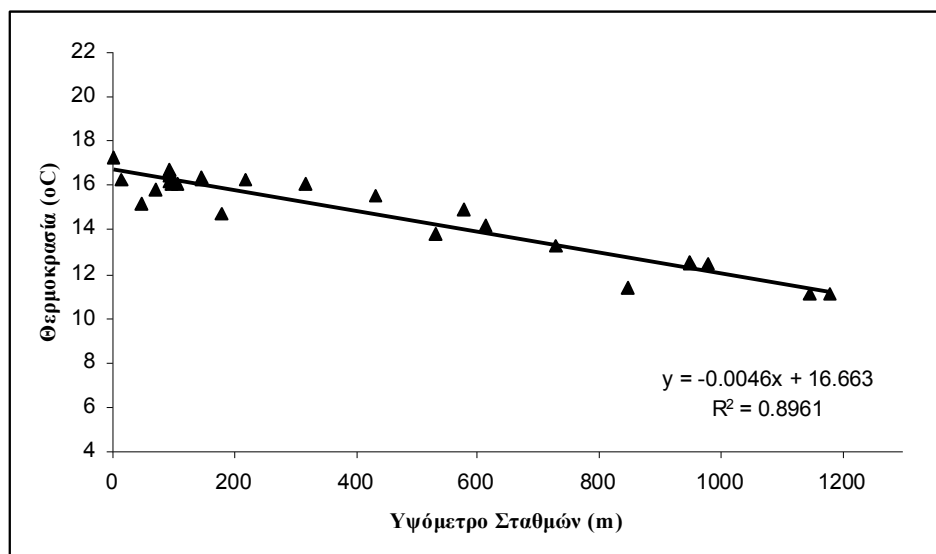


Σχήμα 7. 2. Ορεινή και πεδινή ζώνη της λεκάνης και η θέση του υπόγειου υδροφορέα

Για τη δημιουργία των δεδομένων εισόδου στις δύο υψομετρικές ζώνες χρησιμοποιήθηκαν τυπικές μεθοδολογίες για τη μετατροπή της σημειακής πληροφορίας σε επιφανειακή. Οι επιφανειακές τιμές της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας δημιουργήθηκαν με την υψομετρική αναγωγή των μετρήσεων των μετεωρολογικών σταθμών (Σχήμα 7.3), στο μέσο υψόμετρο των δύο ζωνών με τη χρήση της μεθόδου της θερμοβαθμίδας. Η μέθοδος της θερμοβαθμίδας βασίζεται στην παρατήρηση ότι η θερμοκρασία μειώνεται με την αύξηση του υψόμετρου και χρησιμοποιεί την ετήσια θερμοβαθμίδα που περιγράφει τη μείωση της ετήσιας θερμοκρασίας ανά 100 μέτρα αύξηση του υψόμετρου. Ο υπολογισμός της θερμοβαθμίδας υπολογίστηκε από όλους τους σταθμούς θερμοκρασίας της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλίας (Σχήμα 7.4).



Σχήμα 7. 3. Σταθμοί μέτρησης μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.



Σχήμα 7. 4. Γραμμική σχέση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας με το υψόμετρο των μετεωρολογικών σταθμών για τις δύο υψομετρικές ζώνες

Οι επιφανειακές τιμές της μηνιαίας βροχόπτωσης από τους 12 σταθμούς μέτρησης της ευρύτερης περιοχής (Σχήμα 7.5) δημιουργήθηκαν με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen και την υψομετρική αναγωγή των επιφανειακών τιμών στο μέσο υψόμετρο των δύο ζωνών με τη χρήση της μεθόδου της βροχοβαθμίδας. Με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen υπολογίστηκαν οι συντελεστές στάθμισης για κάθε σταθμό που αντιστοιχούν στα εμβαδά των πολυγώνων επηρεασμού των σταθμών κάθε υπολεκάνης όπως προκύπτει από την χάραξη των μεσοκάθετων επί των αποστάσεων των σταθμών μεταξύ τους (Σχήμα 7.6). Η μέση επιφανειακή βροχόπτωση της υπολεκάνης

(υψομετρικής ζώνης) προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους μηνιαίων υψών βροχόπτωσης των σταθμών πολλαπλασιαζόμενες με τους αντίστοιχους συντελεστές στάθμισης σύμφωνα με την εξίσωση:

$$P_0 = \sum_{n=1}^i \left(\frac{A_i \times P_i}{A} \right) \quad (7.1)$$

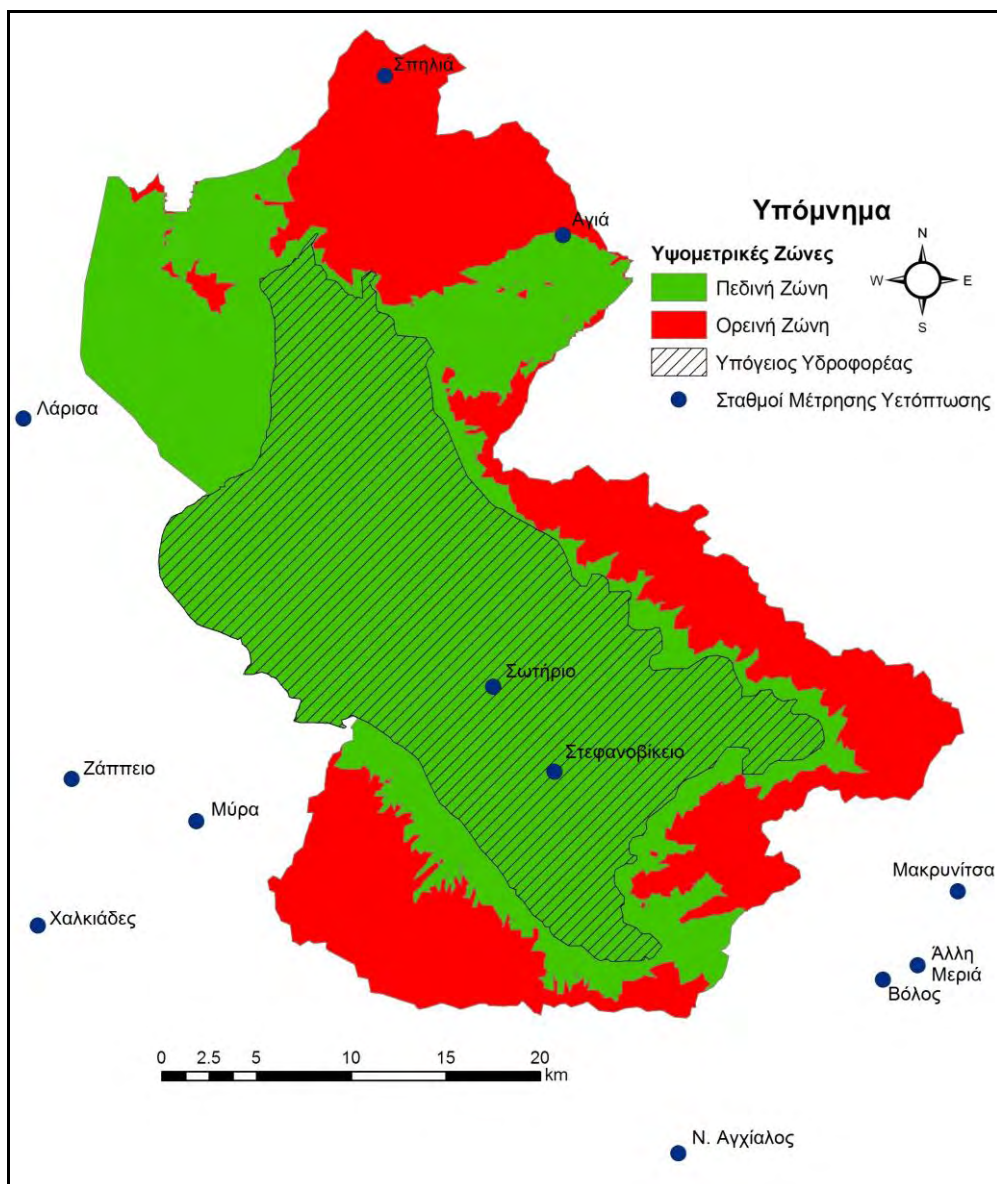
όπου P_i το μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης των σταθμών που επηρεάζουν τη λεκάνη και A_i/A το ποσοστό επηρεασμού του κάθε σταθμού. Η τροποποιημένη μέθοδος Thiessen ολοκληρώνεται με την αναγωγή στο μέσο υψόμετρο της κάθε μίας υψομετρικής ζώνης με τη χρήση της βροχοβαθμίδας, η οποία βασίζεται στην παρατήρηση ότι το ύψος βροχής αυξάνει με την αύξηση του υψομέτρου και χρησιμοποιεί τη βροχοβαθμίδα που είναι ο όρος που περιγράφει την αύξηση του ετήσιου ύψους ανά 100 μέτρα αύξηση του υψομέτρου (Σχήμα 7.7). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μια απλή γραμμική σχέση που συσχετίζει τα υψόμετρα των σταθμών με το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κάθε σταθμού και εφόσον υπάρχει ικανοποιητική συσχέτιση (συντελεστής συσχέτισης $r > 0.70$), η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του ύψους βροχής σε οποιοδήποτε υψόμετρο (Παπαμιχαήλ, 2001). Για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης των δύο υψομετρικών ζωνών της χρησιμοποιούνται τα επιφανειακά δεδομένα που προέκυψαν από τη μέθοδο Thiessen. Η εκτίμηση των μηνιαίων υψών βροχόπτωσης που αντιστοιχούν στα μέσα υψόμετρα των δύο ζωνών, για κάθε έτος, γίνεται με τις σχέσεις:

$$P_k = P_{T(k)} - \frac{(H_{thies} - H_{mz}) * 52.04}{100} \quad (7.2)$$

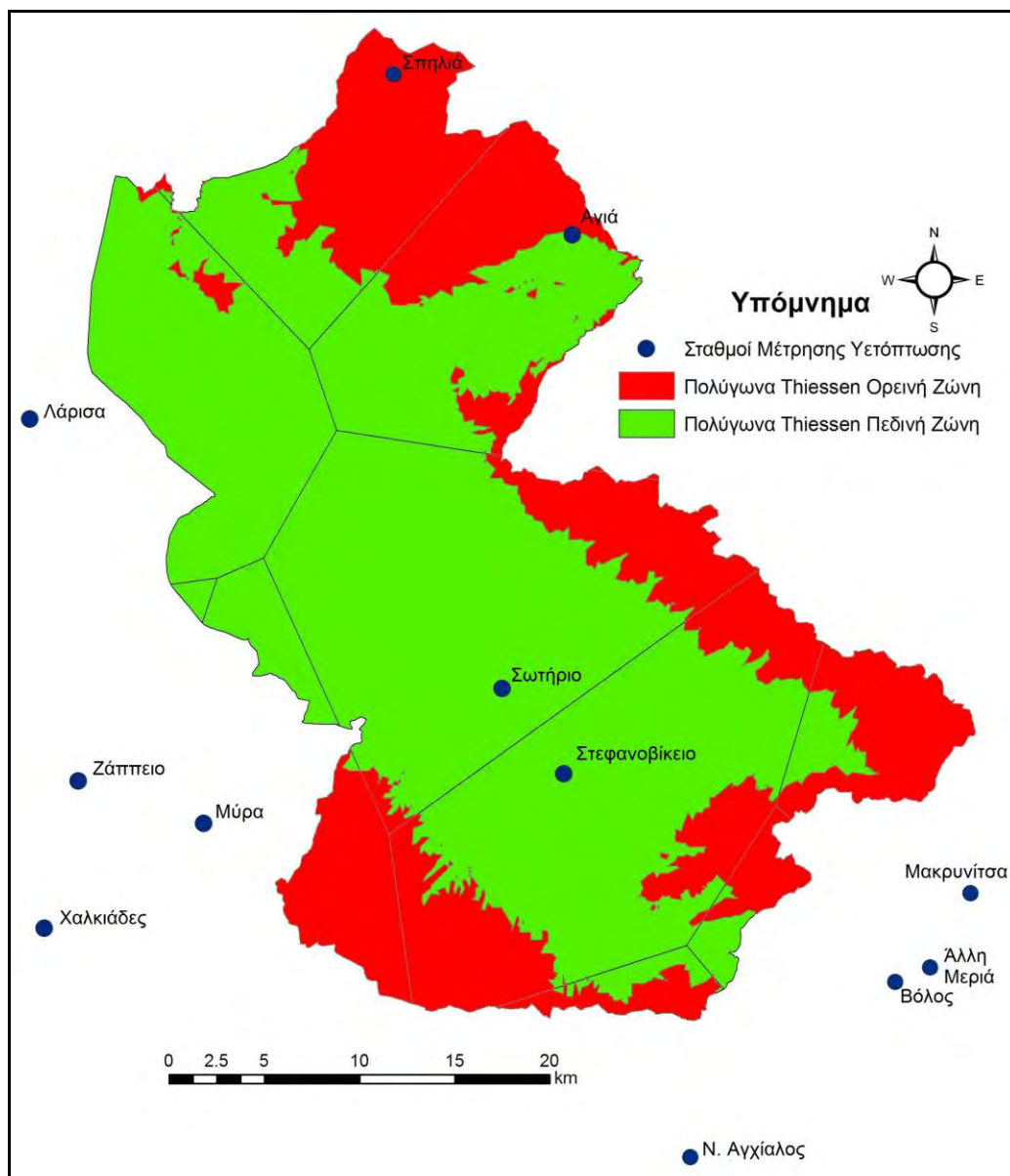
$$P_i^k = \frac{P_k * P_{T(i)}^k}{P_{T(k)}} \quad (7.3)$$

όπου:

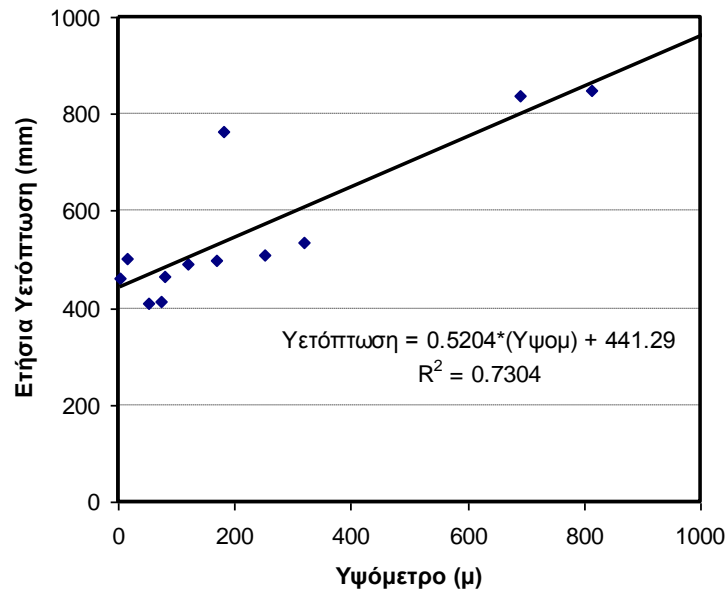
- $P_{T(k)}$, το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης κατά Thiessen, κατά το έτος k σε mm
- P_k , το ετήσιο ύψος της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης στην υψομετρική ζώνη, κατά το έτος k σε mm
- P_i^k το μηνιαίο ύψος επιφανειακής βροχόπτωσης, κατά το μήνα i και το έτος k, στη υπό εξέταση υψομετρική ζώνη της Κάρλας σε mm
- $P_{T(i)}^k$, το επιφανειακό μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης, κατά το μήνα i και το έτος k, της μεθόδου Thiessen σε mm
- 52.04, η βροχοβαθμίδα που υπολογίστηκε (Σχήμα 7.7)
- $H_{thies} - H_{mz}$, η διαφορά ανάμεσα στο σταθισμένο υψόμετρο των σταθμών Thiessen και του μέσου υψομέτρου της υψομετρικής ζώνης της Κάρλας



Σχήμα 7. 5. Σταθμοί μέτρησης μηνιαίας νετόπτωσης στην ευρύτερη περιοχή μελέτης



Σχήμα 7. 6. Πολύγωνα Thiessen στην πεδινή και ορεινή ζώνη της υδρολογικής λεκάνης Κάρλας



Σχήμα 7. 7. Γραμμική σχέση της μέσης ετήσιας υετόπτωσης με το υψόμετρο των μετεωρολογικών σταθμών για τις δύο υψομετρικές ζώνες της υδρολογικής λεκάνης της Κάρλας.

Με βάση τα ανωτέρω υπολογίστηκαν οι επιφανειακές τιμές θερμοκρασίας και υετόπτωσης για την περίοδο Οκτώβριος 1960 – Σεπτέμβριος 2002 για τις δύο υψομετρικές ζώνες. Για την περίοδο Οκτώβριος 2002 έως Σεπτέμβριος 2012 υπήρχαν διαθέσιμες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας και υετόπτωσης μόνο από τον μετεωρολογικό σταθμό της Λάρισας. Έτσι, οι επιφανειακές τιμές θερμοκρασίας και υετόπτωσης των δύο ζωνών συμπληρώθηκαν με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης με διατήρηση της διασποράς ή οργανική συσχέτιση. Η οργανική συσχέτιση εφαρμόζεται κυρίως στην επέκταση δειγμάτων όπου είναι επιθυμητή η διατήρηση των στατιστικών χαρακτηριστικών του αρχικού (προ της συμπλήρωσης) δείγματος. Εγκαταλείποντας την απαίτηση ελαχιστοποίησης του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, εκτιμώνται οι παράμετροι της συσχέτισης διατηρώντας την αρχική μέση τιμή και τη διασπορά. Αυτός ο τρόπος εκτίμησης των παραμέτρων είναι γνωστός ως οργανική συσχέτιση ή και ως επέκταση διατήρησης διασποράς (Maintenance Of Variance Extension – MOVE.1) (Κουτσογιάννης, 1997). Η οργανική συσχέτιση έχει τη μορφή:

$$P_s = a \cdot P_b + b \quad (7.4)$$

όπου:

- P_s , το επιφανειακό μηνιαίο ύψος υετόπτωσης της προς συμπλήρωση ή/και επέκταση υψομετρικής ζώνης (πεδινή ή ορεινή)
- a , η κλίση της ευθείας παλινδρόμησης
- b , η σταθερά της ευθείας παλινδρόμησης
- P_b , το μηνιαίο ύψος υετόπτωσης του σταθμού της Λάρισας

Οι παράμετροι της γραμμής παλινδρόμησης (κλίση και σταθερά) για κάθε μήνα και κάθε ζώνη βρέθηκαν για την κοινή περίοδο δεδομένων του σταθμού βάσης και της προς

συμπλήρωση ζώνης (42 υδρολογικά έτη). Για κάθε μηνιαία γραμμή παλινδρόμησης και για κάθε ζεύγος σταθμών ελέγχθηκε η τιμή του συντελεστή συσχέτισης των δύο δειγμάτων με την κρίσιμη τιμή του, $r_c \approx \max\left\{0.5, \frac{2}{\sqrt{n}}\right\}$. Σε όλες τους μήνες ο

συντελεστής συσχέτισης ήταν μεγαλύτερος της κρίσιμης τιμής της και οι αναπτυγμένες σχέσεις (Εξ. 7.1) είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Ως παράδειγμα, ο Πίνακας 7.1 δείχνει τις μηνιαίες γραμμικές παλινδρομήσεις της πεδινής ζώνης με τον Μ.Σ. της Λάρισας για τη μηνιαία υετόπτωση. Μετά την ανάπτυξη των γραμμών παλινδρόμησης συμπληρώθηκαν τα ελλιπή δεδομένα και επεκτάθηκε το δείγμα των δύο ζωνών με τη χρήση των μηνιαίων γραμμών παλινδρόμησης για την περίοδο Οκτώβριος 2002 έως Σεπτέμβριος 2012.

Πίνακας 7. 1. Αποτελέσματα γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ πεδινής ζώνης της λεκάνης της λίμνης Κάρλας και του Μ.Σ. Λάρισας για τη μηνιαία βροχόπτωση της περιόδου Οκτ. 1960 – Σεπ. 2012

Μήνας	Πλήθος Δεδομένων	Συντελεστής Προσδιορισμού R^2	Συντελεστής Συσχέτισης R	Κρίσιμη Τιμή r_c	Σταθερά b	Κλίση a
Οκτώβριος	42	0.845	0.919	0.5	14.297	1.046
Νοέμβριος	42	0.869	0.932	0.5	22.210	0.680
Δεκέμβριος	42	0.800	0.895	0.5	22.590	0.730
Ιανουάριος	42	0.566	0.752	0.5	14.575	0.918
Φεβρουάριος	42	0.712	0.844	0.5	14.534	0.750
Μάρτιος	42	0.622	0.789	0.5	24.793	0.565
Απρίλιος	42	0.729	0.854	0.5	15.063	0.523
Μάιος	42	0.774	0.880	0.5	12.502	0.703
Ιούνιος	42	0.904	0.951	0.5	3.687	0.716
Ιούλιος	42	0.846	0.920	0.5	6.282	0.948
Αύγουστος	42	0.758	0.871	0.5	6.872	0.493
Σεπτέμβριος	42	0.896	0.946	0.5	4.606	1.090

Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε κάθε ζώνη υπολογίσθηκε με την εφαρμογή της μεθόδου Thornthwaite χρησιμοποιώντας τα επιφανειακά δεδομένα της θερμοκρασίας των δύο υψομετρικών ζωνών. Είναι η πλέον απλή ως προς την υπολογιστική διαδικασία μέθοδος η οποία έχει τύχει ευρύτατης εφαρμογής αν και τείνει να ξεπεραστεί (χρονολογείται από το 1948). Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή κάποιου μήνα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_p = 16 \left(\frac{10 T_a}{I} \right)^a \frac{\mu N}{360} \quad (7.5)$$

όπου:

- E_p , η δυνητική εξατμοδιαπνοή σε mm/μήνα

- T_a , η μέση θερμοκρασία του μήνα σε °C
- μ , ο αριθμός των ημερών του μήνα
- N , η μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας (λαμβάνεται η τιμή στην μέση του μήνα)
- I , εμπειρικός συντελεστής που ονομάζεται ετήσιος θερμικός δείκτης
- a , άλλος εμπειρικός συντελεστής, συνάρτηση του I

Οι εμπειρικοί συντελεστές υπολογίζονται από το δείγμα των μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών του έτους (T_{aj} , $j=1..12$) ως εξής:

$$I = \sum_{n=1}^{12} \left(\frac{T_n}{5} \right)^{1.514} \quad (7.6)$$

$$a = 0.000000675I^3 - 0.000077I^2 + 0.01792I + 0.49239 \quad (7.7)$$

όπου, T_n η κανονική θερμοκρασία κάθε μήνα.

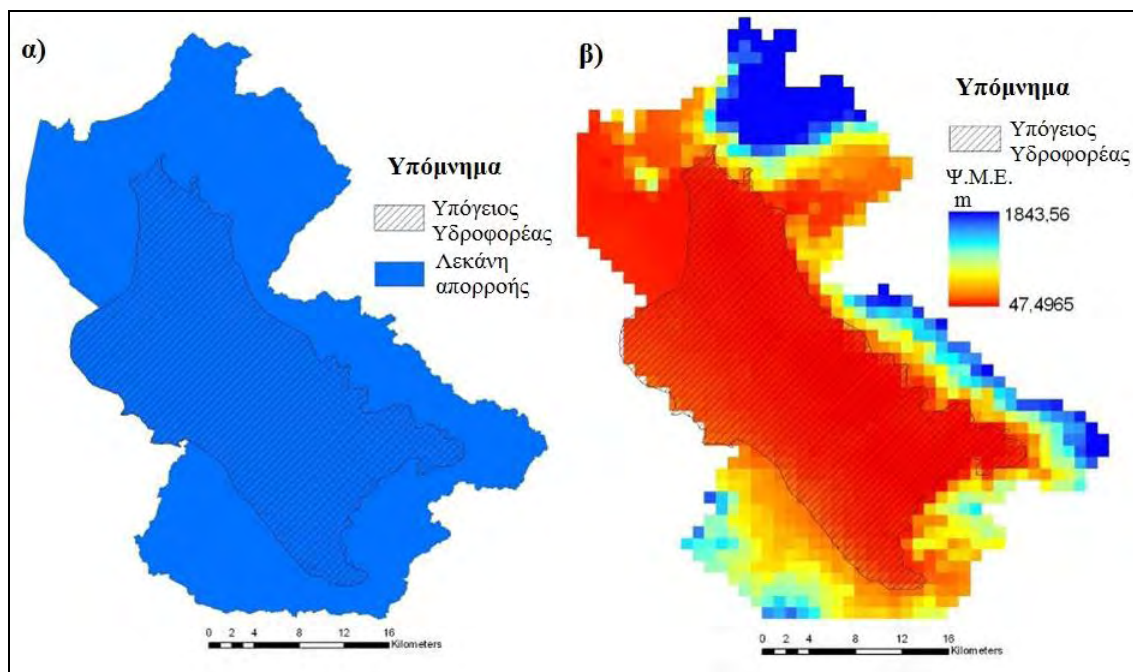
7.1.1. Βέλτιστη εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου με το μοντέλο υπόγειας ροής

Η επιλογή του διαχωρισμού της λεκάνης στις δύο ζώνες δεν έγινε τυχαία. Προήλθε από ένα συνδυασμό εφαρμογών του UTHBAL με το MODFLOW ως προς τη χωρική τους διακριτοποίηση (Loukas, et al., 2008a), χρησιμοποιώντας τα ίδια υδρολογικά δεδομένα, αλλά για την περίοδο Οκτώβριος 1960 έως Σεπτέμβριος 2002. Μελετήθηκαν εννιά συνδυασμοί χωρικής σύνδεσης των δύο μοντέλων, τρεις για το UTHBAL:

- Ανδρομερή μορφή: η λεκάνη της Κάρλας αντιμετωπίστηκε ως ενιαία, με τη συνολική της κατείσδυση να συνεισφέρει στον υπόγειο υδροφορέα (Σχήμα 7.8α)
- Ημι-κατανεμημένη μορφή: η λεκάνη της Κάρλας χωρίστηκε σε δύο ζώνες (πεδινή και ορεινή) με τον υπόγειο υδροφορέα να ανήκει εξ' ολοκλήρου στην πεδινή ζώνη και να δέχεται την κατείσδυση μόνο από αυτήν (Σχήμα 7.5)
- Κατατεμημένη μορφή: η λεκάνη της Κάρλας διακριτοποιήθηκε σε κάρναβο με κελιά διαστάσεων 1 Km x 1 Km. Η κατείσδυση προς τον υπόγειο υδροφορέα προερχόταν μόνο από τα κελιά που βρίσκονταν εντός των ορίων του (Σχήμα 7.8β)

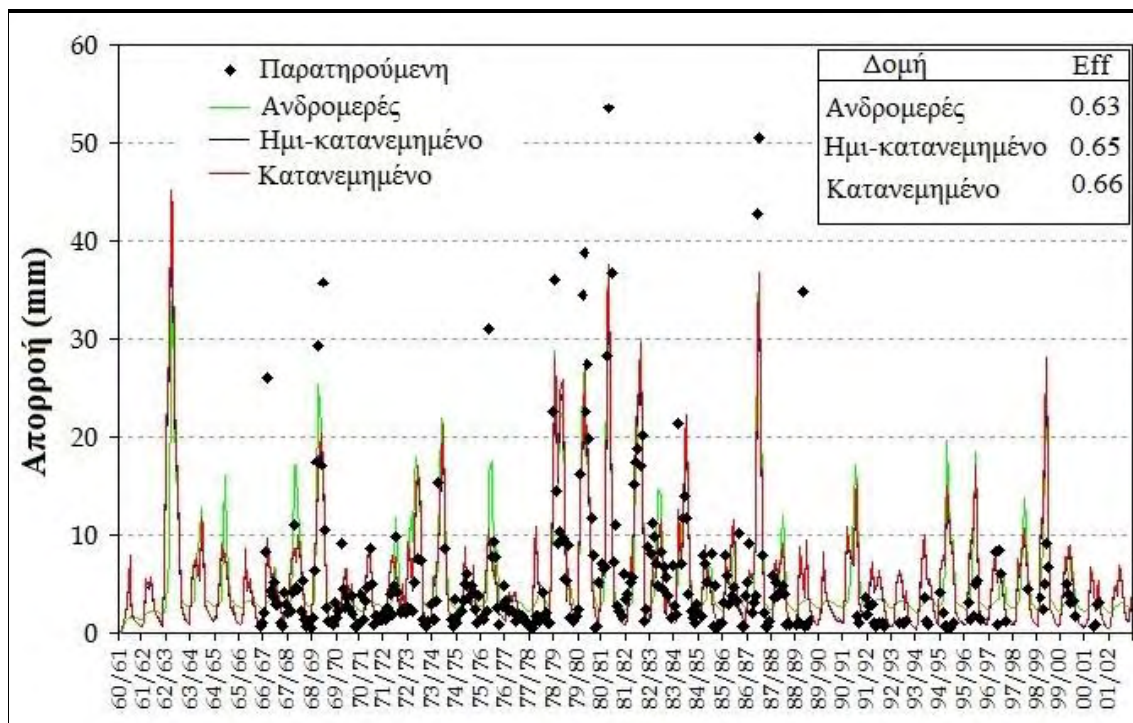
και τρεις για το MODFLOW:

- Κάρναβος με διαστάσεις κελιών 400 m x 400 m
- Κάρναβος με διαστάσεις κελιών 200 m x 200 m
- Κάρναβος με διαστάσεις κελιών 100 m x 100 m



Σχήμα 7. 8. Χωρική δομή προσομοίωσης της λεκάνης από το UTHBAL: α) Ενιαία μορφή και β) κατανεμημένη

Οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τη βέλτιστη σύγκλιση των προσομοιωμένων τιμών απορροής με τις αντίστοιχες παρατηρούμενες των τριών χωρικών δομών του UTHBAL για την περίοδο προσομοίωσης (Οκτώβριος 1960 - Σεπτέμβριος 2002) ήταν αρκετά κοντά (Σχήμα 7.9).



Σχήμα 7. 9. Διάγραμμα με τις προσομοιωμένες απορροές των τριών χωρικών μορφών του UTHBAL και τις παρατηρούμενες

Το κριτήριο αυτό δεν ήταν ικανό να οδηγήσει στην επιλογή μίας εκ των τριών δομών, απεναντίας δείχνει πως τα αποτελέσματα της ρύθμιση των τριών μορφών του UTHBAL είναι ικανοποιητικά. Πρέπει να σημειωθεί ότι το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στη ρύθμιση των τριών μορφών χωρικής διακριτοποίησης του MODFLOW. Το κριτήριο όμως για την επιλογή της ημι-κατανεμημένης μορφής αποτέλεσαν τα αποτελέσματα του MODFLOW, τα οποία ήταν:

- Η ανδρομερής μορφή του UTHBAL έδινε έναν υπερεκτιμημένο όγκο νερού που κατεισδύει στον υπόγειο υδροφορέα, ο οποίος έφτανε ακόμη και τα 164 hm^3 ετησίως και αυτό οφείλεται στο ότι σε αυτήν τη σύζευξη η κατείσδυση όλης της λεκάνης καταλήγει στον υπόγειο υδροφορέα. Η αντιμετώπιση αυτή όμως είναι εσφαλμένη μιας και η έκταση του υπόγειου υδροφορέα είναι σχεδόν η μισή της λεκάνης (Σχήμα 7.5).
- Από την άλλη πλευρά η κατανεμημένη μορφή του UTHBAL αποτελεί χωρικά την καταλληλότερη επιλογή διότι η περιοχή της λεκάνης απορροής που συνεισφέρει στην κατείσδυση εμπίπτει ακριβώς εντός των ορίων του υπόγειου υδροφορέα, αλλά η διακριτοποίηση του μοντέλου καθιστά την προσομοίωση επίπονη και αρκετά χρονοβόρα. Επιπλέον ο μέσος ετήσιος όγκος νερού που κατεισδύει στον υπόγειο υδροφορέα είναι 27.8 hm^3 , πολύ κοντά στον αντίστοιχο που εκτιμά η ημι-κατανεμημένη μορφή (31 hm^3), η οποία δεν απαιτεί τόσο μεγάλο υπολογιστικό φόρτο και όγκο. Το τελευταίο αυτό κριτήριο καθιστά την ημι-κατανεμημένη μορφή του UTHBAL ως την καταλληλότερη.

Με την επιλογή, λοιπόν, της ημι-κατανεμημένης μορφής του UTHBAL και του διαχωρισμού της λεκάνης σε δύο ζώνες, πραγματοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις, μία για την ορεινή ζώνη και μία για την πεδινή.

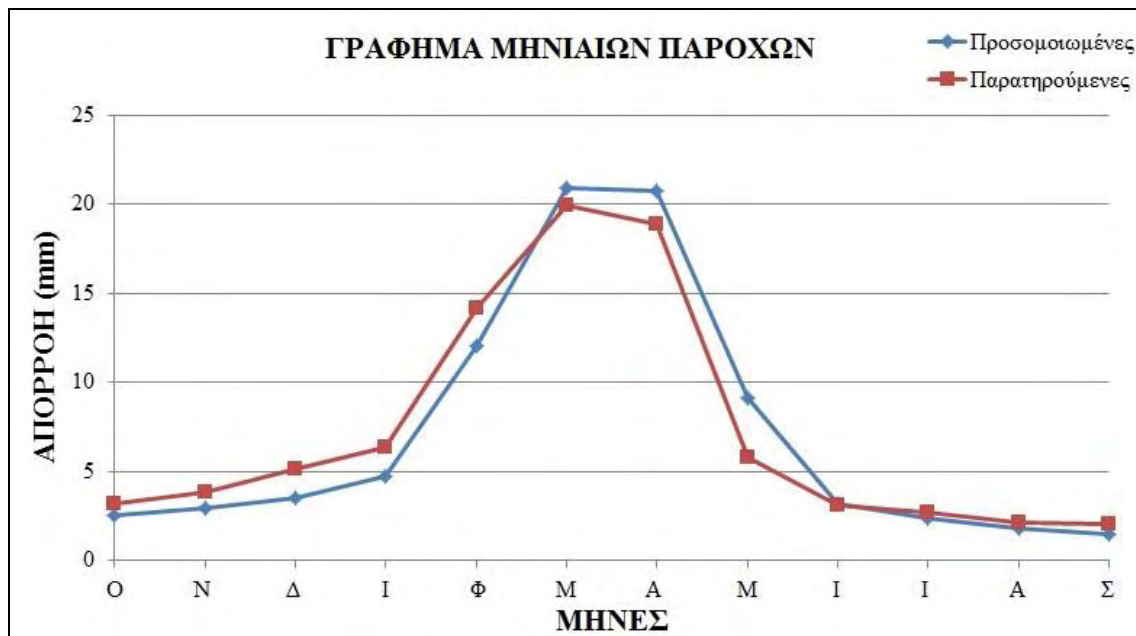
Η βαθμονόμηση των 12 παραμέτρων του μοντέλου (έξι για την πεδινή και έξι για την ορεινή ζώνη) πραγματοποιήθηκε στις παρατηρούμενες τιμές απορροής που υπήρχαν στην έξοδο της τέως λίμνης Κάρλας προς τον Παγασητικό Κόλπο. Οι παράμετροι του μοντέλου υδατικού ισοζυγίου βελτιστοποιήθηκαν (calibration) και η αποδοτικότητα των μοντέλων ελέγχθηκε (validation) με τη μέθοδο του χωριστού δείγματος (split sample test). Η μέθοδος του χωριστού δείγματος είναι μια ανεξάρτητη και αμερόληπτη (unbiased) μέθοδος ελέγχου των προσομοιώσεων. Οι παράμετροι των μοντέλων προσαρμόστηκαν στις βέλτιστες τιμές τους χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο γενικευμένης ανηγμένης κλίσης με πολλαπλές εκκινήσεις (multi-start generalized reduced gradient algorithm) με ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων μεταξύ παρατηρημένης και προσομοιωμένης απορροής. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση είναι η model efficiency (Eff) των Nash και Sutcliffe (Nash et. al., 1970) και χρησιμοποιείται ευρέως στις υδρολογικές προσομοιώσεις και δίνεται από τον τύπο:

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qsim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - \overline{Qobs})^2} \quad (7.8)$$

όπου:

- $Qobs_i$, η παρατηρημένη απορροή του μήνα i , $Qsim_i$ η προσομοιωμένη απορροή του μήνα i
- \overline{Qobs} , ο μέσος όρος των τιμών της μηνιαίας παρατηρημένης απορροής

Επίσης, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των μηνιαίων ολικών προσομοιωμένων απορροών των δύο λεκανών με τις αντίστοιχες παρατηρούμενες, όπως φαίνεται στο γράφημα του Σχήματος 7.10.



Σχήμα 7. 10. Μηνιαίες προσομοιωμένες και παρατηρούμενες απορροές

Η αποδοτικότητα του μοντέλου (Model efficiency) κρίνεται ικανοποιητική αφού τα απορροϊκά δεδομένα της ιστορικής περιόδου είχαν μεγάλα κενά για συνεχόμενες χρονικές περιόδους ($Eff=0.66$ για περίοδο βελτιστοποίησης και πιστοποίησης). Με τους συντελεστές του μοντέλου βελτιστοποιημένους (Πίνακας 7.2) και με τα δεδομένα εισόδου για κάθε μία υψομετρική ζώνη το μοντέλο εφαρμόστηκε για την προσομοίωση του υδρολογικού ισοζυγίου και τον υπολογισμό της κατείδυσης στον υπόγειο υδροφόρο.

Πίνακας 7. 2. Παράμετροι του UTHBAL για τις δύο λεκάνες, όπως προέκυψαν από τη ρύθμισή του

Λεκάνη	Συντελεστής δυναμικής τήξης χιονιού C_m	Curve Number CN	Συντελεστής κατείσδυσης K* ($0 \leq K \leq 1$)	Συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής a ($0 \leq a \leq 1$)	Συντελεστής ενδιάμεσης απορροής β ($0 \leq \beta \leq 1$)	Συντελεστής βασικής απορροής γ ($0 \leq \gamma \leq 1$)
Πεδινή	0.119	52.52	0.72	0.65	0.010	0.646
Ορεινή	0.37	47.8	0.81	0.78	0	0.061

*Ο συντελεστής κατείσδυσης K δεν εκφράζει την επαναφόρτιση του υπόγειου υδροφορέα, δείτε εξισώσεις 6.1-6.18

Τα αποτελέσματα του ισοζυγίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 για τις δύο υψομετρικές ζώνες. Επισημαίνεται ότι η μόνο η κατείσδυση της πεδινής ζώνης συνεισφέρει στον υπόγειο υδροφορέα της περιοχής μελέτης. Στον ίδιο πίνακα φαίνονται και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των δύο υψομετρικών ζωνών. Για τη διαχειριστική περίοδο 2012-2044, τα υδρομετεωρολογικά δεδομένα προήλθαν από την επανάληψη των τελευταίων 33 ετών, δηλαδή 1980-2012.

Πίνακας 7. 3. Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά υψομετρικών ζωνών και υδρολογικό ισοζύγιο για τις δύο υψομετρικές ζώνες στην υδρολογική λεκάνη Κάρλας μετά την εφαρμογή του ημι-κατανεμημένου υδρολογικού μοντέλου για την υδρολογική περίοδο Οκτ. 1960 - Σεπ. 2012

Γεωμορφολογικά Χαρακτηριστικά & Υδρολογικό Ισοζύγιο	Πεδινή Ζώνη	Ορεινή Ζώνη
Έκταση (Km ²)	808.2	411.68
Μέσο Υψόμετρο (m)	81.5	521.0
Μέση Ετήσια Θερμοκρασία (°C)	15	12.9
Μέση Ετήσια Υετόπτωση (mm)	483.3	741.5
Μέση Ετήσια Δυναμική Εξατμισοδιαπνοή (mm)	832.3	735.8
Μέση Ετήσια Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή (mm)	403.4	423.0
Μέση Ετήσια Κατείσδυση (mm)	38.7	239.1
Μέση Ετήσια Απορροή (mm)	39.6	75.0

7.2. Προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα

Το μηνιαίο μοντέλο προσομοίωσης του ταμιευτήρα βασίστηκε στο νομογράφημα του ταμιευτήρα (Σχήμα 5.17) και στις αρχές λειτουργίας του, όπως παρουσιάστηκαν στο υποκεφάλαιο 5.6.5. Πρέπει να τονισθεί εδώ πως στο εν λόγω κεφάλαιο οι μέσες ετήσιες τιμές των όγκων εισροής και εκροής προήλθαν από τον κατασκευαστή του ταμιευτήρα. Στην εν λόγω έρευνα, αυτές εκτιμώνται από τα μοντέλα με εξαίρεση την εκροή για άρδευση, η οποία ήταν σταθερή για κάθε έτος. Επειδή ο ταμιευτήρας τίθεται σε λειτουργία το 2012, η περίοδος προσομοίωσης του UTHRL είναι η 2012-2044.

Η απορροή στον ταμιευτήρα, των λεκανών εκείνων - έκτασης 1020 Km² - που εξυπηρετούνται από το σύστημα των τάφρων και συλλεκτήρων, προήλθε από το UTHBAL, η απ' ευθείας βροχόπτωση προέκυψε με αναγωγή της βροχόπτωσης της

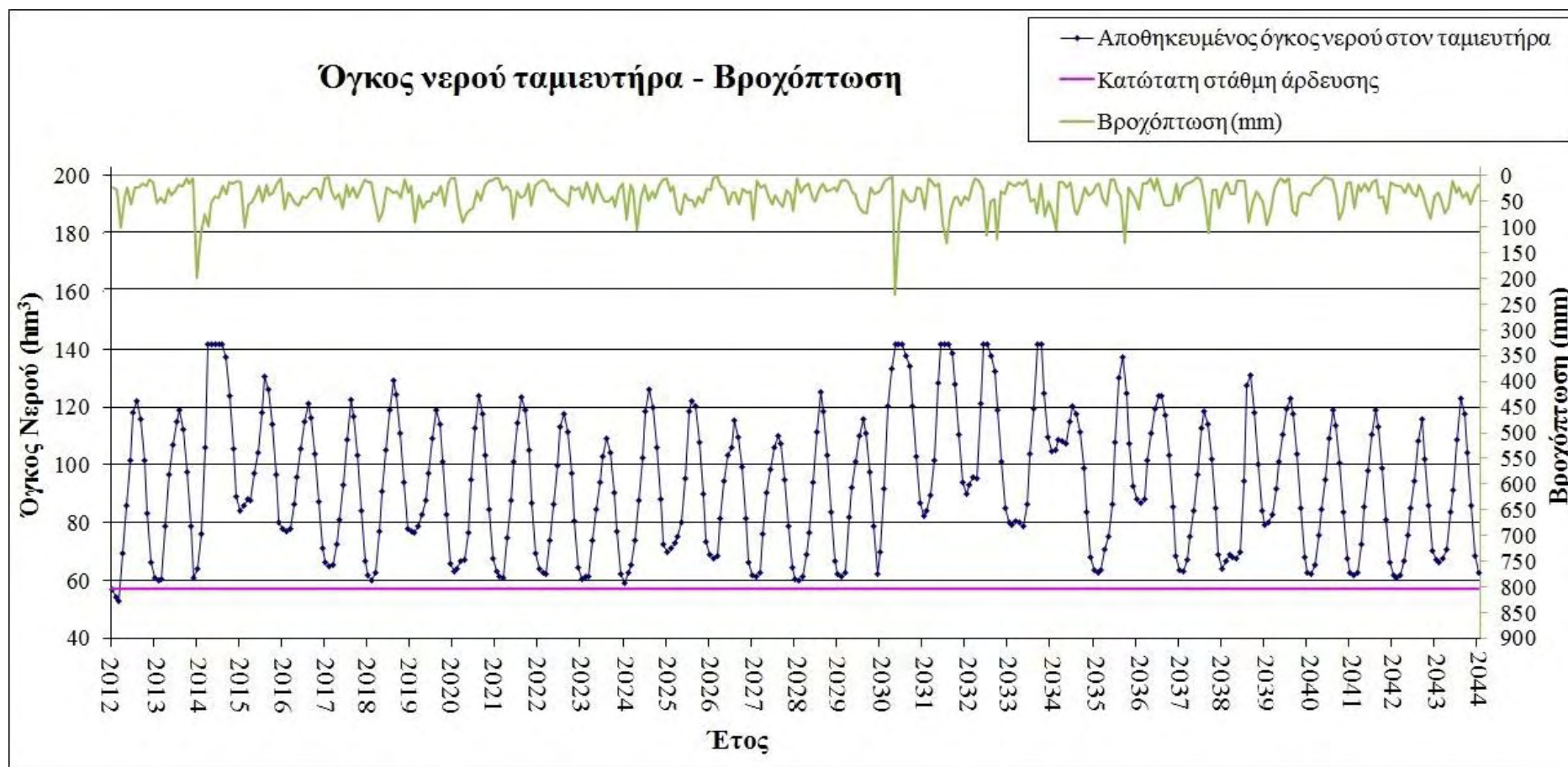
πεδινής λεκάνης στο υψόμετρο του ταμιευτήρα, μιας και αυτός βρίσκεται στο χαμηλότερο υψόμετρο της λεκάνης (+44 m), ενώ οι εισροές από τον Πηνειό ρυθμίστηκαν ώστε να είναι οι λιγότερες δυνατές. Η ρύθμιση αυτή έγινε με βάση τα δύο βασικά κριτήρια λειτουργίας του ταμιευτήρα:

- Ο όγκος του ταμιευτήρα να μην είναι μικρότερος των 57.01 hm^3 που αντιστοιχεί στο κατώτερο οικολογικό όριο των +46.4 m, το οποίο έχει οριστεί από τους περιβαλλοντικούς όρους του έργου.
- Να αντλείται από τον Πηνειό η λιγότερη δυνατή ποσότητα ύδατος σε συνδυασμό με το να υπερχειλίζει όσο το δυνατό λιγότερος όγκος νερού. Ο υπερχειλιστής βρίσκεται σε απόλυτο ύψος +48.8 m και αντιστοιχεί σε όγκο 141.14 hm^3 . Θα αποτελεί μεγάλη σπατάλη ενέργειας από τη μία να εισέρχονται οι πλημμυρικές απορροές του Πηνειού και από την άλλη να υπερχειλίζει νερό του ταμιευτήρα εξαιτίας σημαντικών επιφανειακών εισροών από τη λεκάνη.

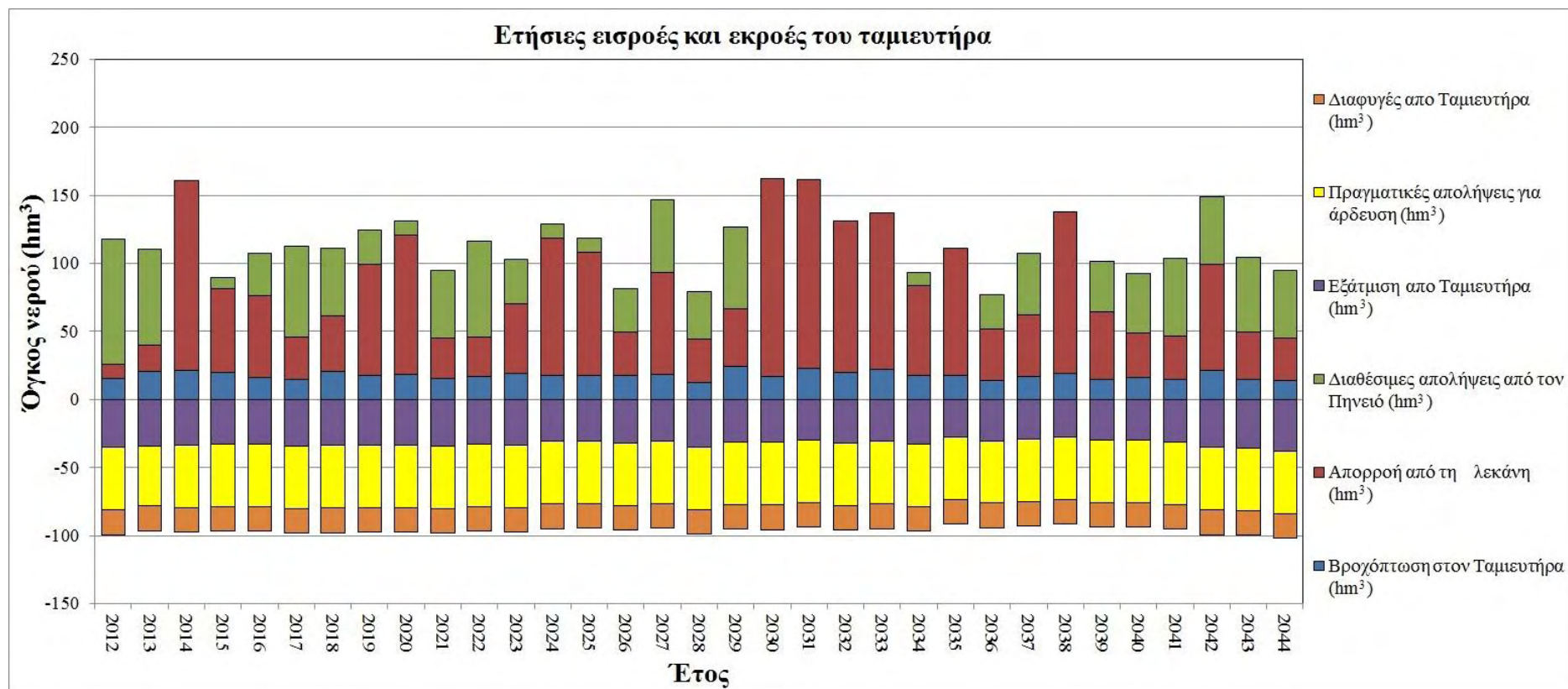
Όσον αφορά τις εκροές, η εξάτμιση υπολογισθηκε για τον υδάτινο καθρέφτη της λίμνης έκτασης 32000 στρ., οι απολήψεις για άρδευση ήταν σταθερές και ίσες με 46 hm^3 τον χρόνο, απλά κατανεμήθηκαν στην ξηρή περίοδο και οι διαφυγές, ενώ στην αρχή ελήφθησαν ίσες με 20 hm^3 τον χρόνο μετά διορθώθηκαν από τις αντίστοιχες του LAK3, οι οποίες ήταν 18 hm^3 τον χρόνο, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω. Οι τιμές αυτές των διαφυγών είναι μέσες ετήσιες μιας και τα αποτελέσματα του LAK3 ήταν μηνιαία και οι διαφυγές εξαρτώνται άμεσα και από τον όγκο του νερού που διαθέτει ο ταμιευτήρας (εξ. 6.25).

Στο γράφημα του Σχήματος 7.11 παρουσιάζονται οι μηνιαίες τιμές του όγκου του ταμιευτήρα για τη διαχειριστική περίοδο, όπως εκτιμήθηκε από το UTHRL και τα μηνιαία ύψη βροχόπτωσης της λεκάνης. Η συνύπαρξή τους στο ίδιο γράφημα έγινε για συγκριτικούς λόγους φανερώνοντας το πώς εξαρτάται ο όγκος του ταμιευτήρα από τη βροχόπτωση. Ο λόγος οφείλεται καθαρά σε έναν από τους στόχους του ταμιευτήρα, ο οποίος είναι η αντιπλημμυρική θωράκιση της πεδιάδας, εξού και η κατασκευή των συλλεκτήρων και τάφρων, που οδηγούν την επιφανειακή απορροή της λεκάνης σε αυτόν.

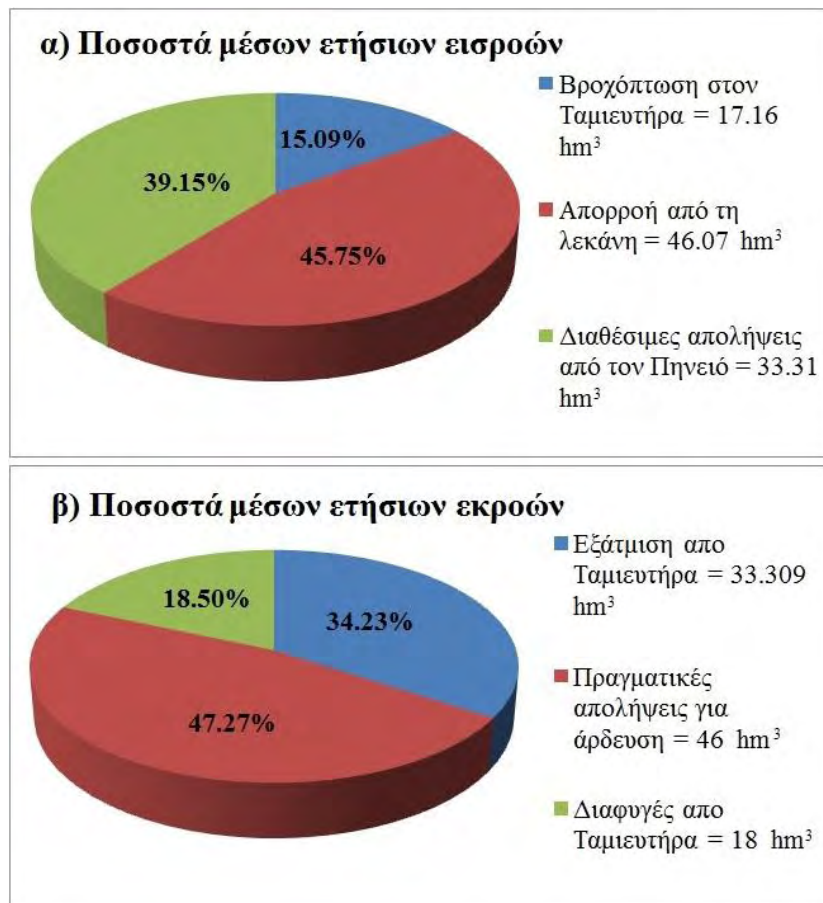
Στο γράφημα του Σχήματος 7.12 παρουσιάζονται οι ετήσιες εισροές και εκροές του ταμιευτήρα, ενώ στα γραφήματα του Σχήματος 7.13 τα ποσοστά των μέσων ετήσιων τιμών τους.



Σχήμα 7. 11. Γραφήματα μηνιαίων τιμών του όγκου νερού του ταμιευτήρα και της βροχόπτωσης για τη διαχειριστική περίοδο 2012-2044



Σχήμα 7. 12. Ετήσιες τιμές εισροών και εκροών του ταμιευτήρα για τη διαχειριστική περίοδο 2012-2044



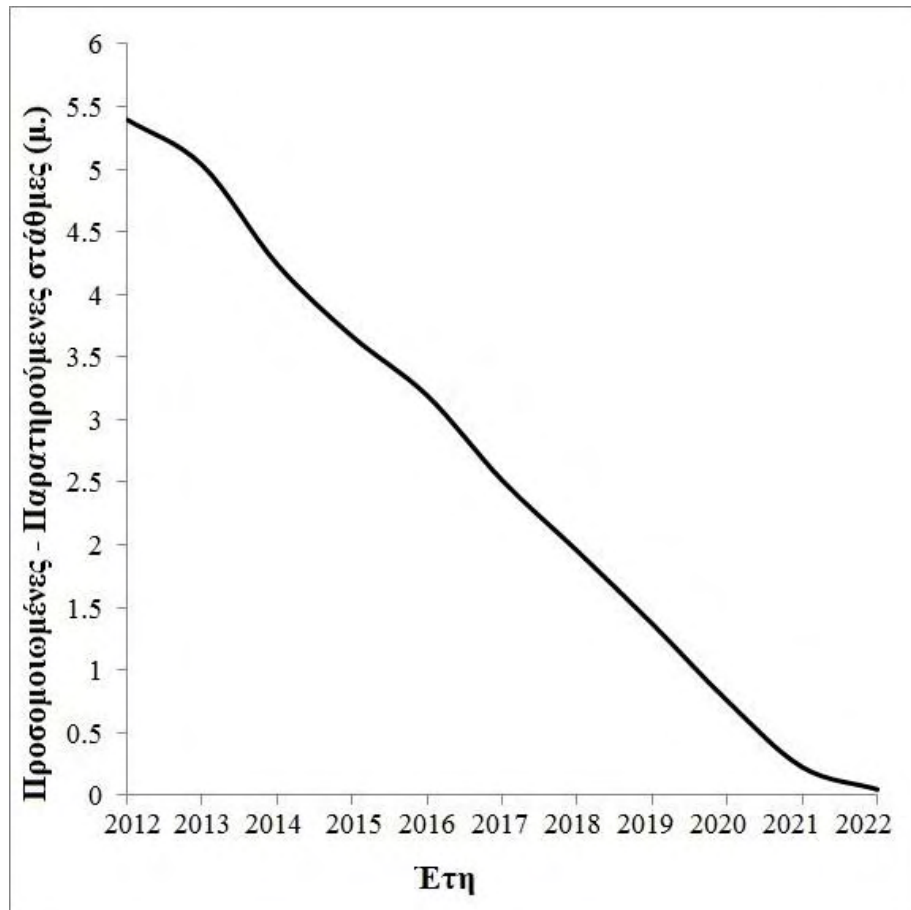
Σχήμα 7. 13. Ποσοστά μέσων ετήσιων: α) Εισροών και β) Εκροών του ταμιευτήρα για τη διαχειριστική περίοδο 2012-2044

7.3. Προσομοίωση της υδραυλικής επικοινωνίας του ταμιευτήρα με τον υπόγειο υδροφορέα

Η προσομοίωση αυτή πραγματοποιήθηκε από το LAK3 σε μηνιαία βάση. Εφόσον αποτελεί υπορουντίνα του GMS και είναι άμεσα συνδεδεμένο με το MODFLOW, απαιτείται πρώτα η προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα. Στην πράξη πραγματοποιήθηκε όντως πρώτα η ανάπτυξη και η ντετερμινιστική εφαρμογή του MODFLOW, δέχοντας ως διαφυγές τη μέση ετήσια εκτίμηση των κατασκευαστών του ταμιευτήρα ίση με 20 hm^3 και σε δεύτερη φάση διορθώθηκε αυτή η τιμή με βάση τα μηνιαία αποτελέσματα των διαφυγών του LAK3.

Το μοντέλο δέχεται ως δεδομένα τις μηνιαίες τιμές των εισροών και εκροών του ταμιευτήρα και υπολογίζει τις μηνιαίες τιμές των υπόγειων διαφυγών. Όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 6.3, το μοντέλο ρυθμίζεται ως προς τον λόγο της κατακόρυφης υδραυλικής αγωγιμότητας του πυθμένα της λίμνης προς το βάθος, η οποία και καθορίζει τις διαφυγές. Η ρύθμιση πραγματοποιήθηκε για την πρώτη δεκαετία 2012-2022 με βάση τις μηνιαίες στάθμες του ταμιευτήρα, δέχοντας ως παρατηρούμενες αυτές που προέκυψαν από το UTHRL. Στο Σχήμα 7.14 παρουσιάζεται διάγραμμα της διαφοράς των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών. Ο συντελεστής προσδιορισμού ισούται με 0.7805. Αρχικά οι στάθμες δεν συγκλίνουν, ενώ

στο τέλος της προσομοίωσης η σύγκλιση κρίνεται ικανοποιητική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως απαιτείται μια μικρή περίοδος μέχρι το μοντέλο να ρυθμιστεί ικανοποιητικά. Η τιμή της παραμέτρου προέκυψε ίση με $Kz/\Delta l = 2.79 \cdot 10^{-6} \text{ 1/d}$. Οι μηνιαίες διαφυγές που υπολογίστηκαν δεν είχαν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους όπως αυτές του όγκου (Σχήμα 7.11) δίνοντας για κάθε χρόνο το σύνολο των 18 hm^3 , όπως εισήχθησαν στο UTHRL, σε μεταγενέστερη εφαρμογή του.



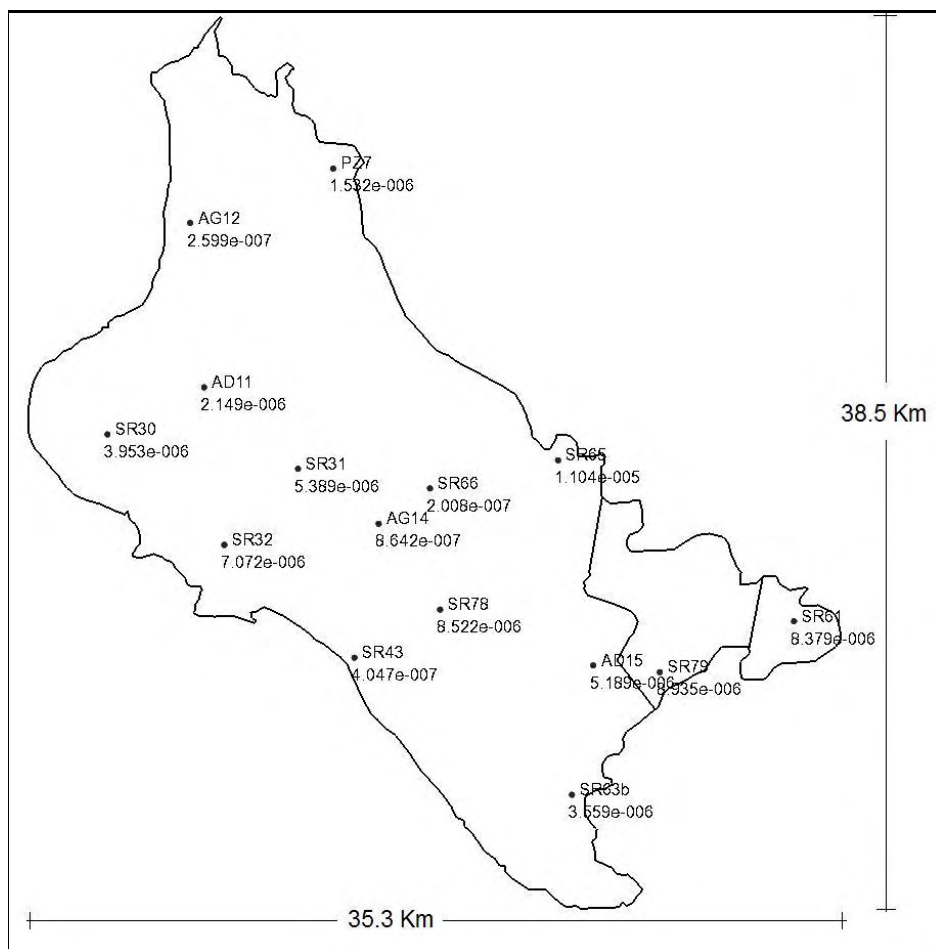
Σχήμα 7. 14. Σύγκλιση προσομοιωμένων και παρατηρούμενων υψομέτρων στάθμης του ταμιευτήρα για τη δεκαετία προσομοίωσής του

7.4. Στοχαστική προσομοίωση της υδραυλικής αγωγιμότητας

Η στοχαστική προσομοίωση της υδραυλικής αγωγιμότητας έγινε με τη χρήση της Γεωστατιστικής Βιβλιοθήκης GSLIB. Η προσομοίωση αυτή αφορά την εκ των προτέρων κατάσταση προτού να ξεκινήσει η διαδικασία της αξίας της πληροφορίας. Επίσης, τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν τόσο από το GSLIB όσο και από το MODFLOW, θα αναφέρονται και αυτά στην εκ των προτέρων κατάσταση. Η διαδικασία της αξίας της πληροφορίας θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Αρχικά βρέθηκαν 15 δειγματοληπτικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας στο πεδίο μελέτης και με βάση αυτές ξεκίνησε η γεωστατιστική προσέγγιση. Στον Πίνακα 7.4 παρουσιάζονται οι τιμές αυτές, καθώς και οι ονομασίες των γεωτρήσεων από τις οποίες

προέκυψαν, οι συντεταγμένες τους σε ΕΓΣΑ '87 και η θέση τους. Στο χάρτη του Σχήματος 7.15 φαίνεται η θέση αυτών στο πεδίο μελέτης.

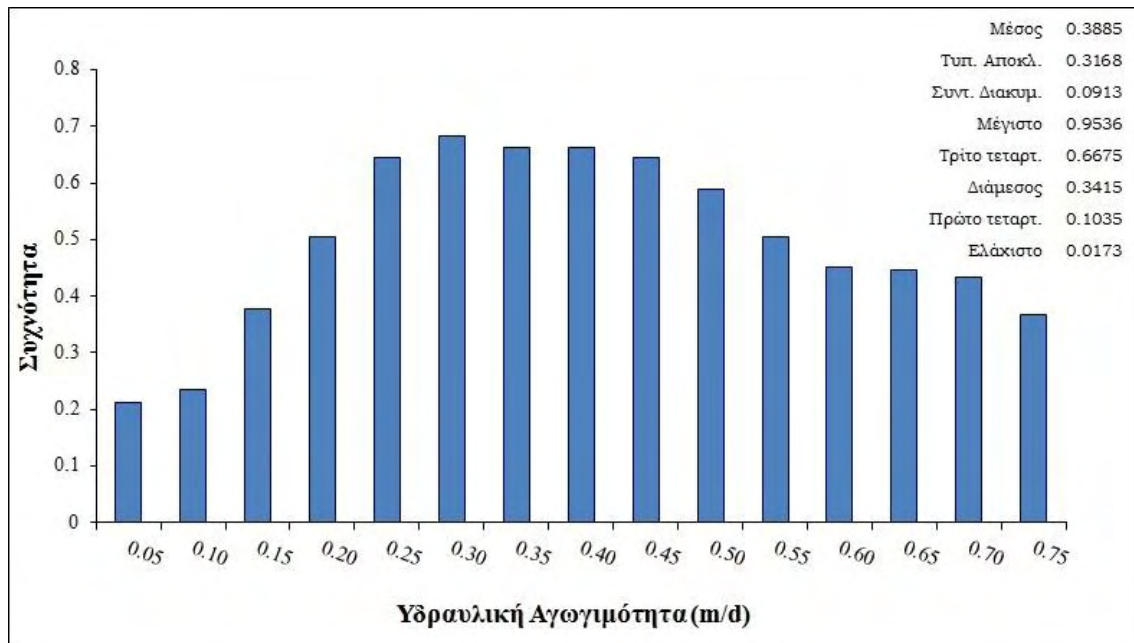


Σχήμα 7. 15. Θέσεις των δειγματοληπτικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας

Πίνακας 7. 4. Στοιχεία των δειγματοληπτικών μετρήσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας

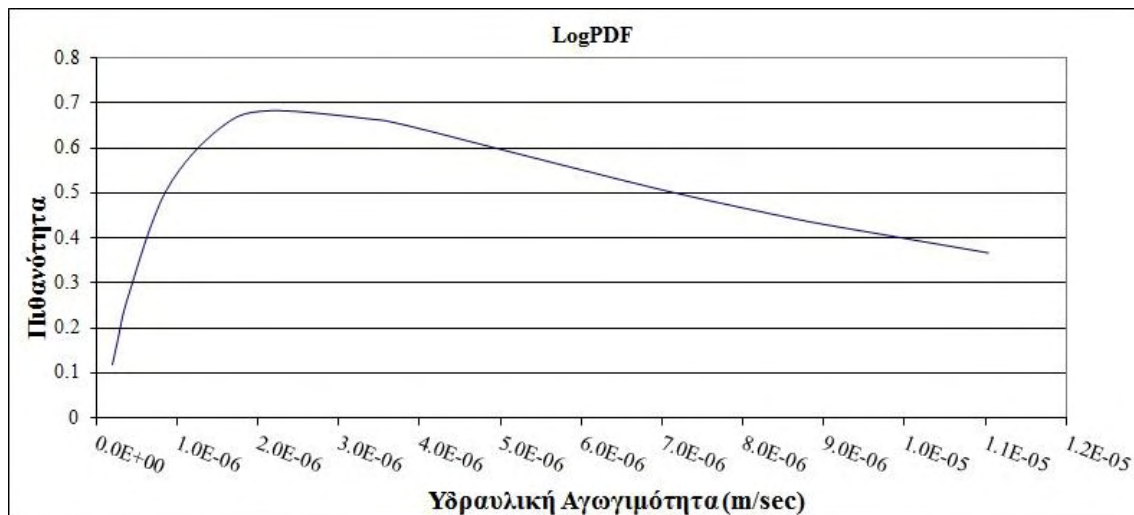
A/A	Γεώτρηση	X	Y	Θέση	K(m/sec)	K(m/d)
1	PZ7	642281.71	4391852.7	Νεοχώρι	1.53163E-06	0.1323
2	AD11	636705.3	4382398.7	Μόδεστρος	2.14928E-06	0.1857
3	AD15	653522.2	4370389.9	Κάρλα	5.18898E-06	0.4483
4	AG12	636100	4389500	Πλατύκαμπος	2.59884E-07	0.0225
5	SR66	646465.4	4378039.3	Νίκη	2.00803E-07	0.0173
6	SR43	643202	4370724	Κοκκίνες	4.04676E-07	0.0350
7	SR32	637576.8	4375595.9	Κυψέλη	7.07214E-06	0.6110
8	SR31	640758	4378886.7	Μέλισσα	5.38851E-06	0.4656
9	SR30	632522.3	4380364	Χάλκη	3.95257E-06	0.3415
10	AG14	644246	4376506	Νίκη	8.64242E-07	0.0747
11	SR65	652000	4379250	Καλαμάκι	1.10375E-05	0.9536
12	SR78	646900	4372800	Αρμένιο	8.52152E-06	0.7363
13	SR79	656400	4370100	Γωνία Ταμιευτ.	8.93495E-06	0.7720
14	SR61	662200	4372300	Κανάλια	8.37851E-06	0.7239
15	SR63b	652600	4364806	Ριζόμυλος	3.55872E-06	0.3075

Το ιστόγραμμα της συχνότητας των δειγματοληπτικών τιμών σε m/d και τα χαρακτηριστικά στατιστικά μεγέθη αυτών παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.16.



Σχήμα 7. 16. Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης των δειγματοληπτικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας σε m/d

Για την παραγωγή του ημιβαριογράμματος το πεδίο των υδραυλικών αγωγιμοτήτων θεωρήθηκε λογαριθμικό και στάσιμο με μέση τιμή $m_{\log k} = -5.607$ (-0.67 για m/d) και τυπική απόκλιση $\sigma_{\log k}^2 = 0.581$. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των λογαριθμικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας απεικονίζεται στο γράφημα του Σχήματος 7.17.



Σχήμα 7. 17. Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των λογαριθμικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας

Το αρχείο εισόδου του GSLIB παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.5.

Πίνακας 7. 5. Αρχείο εισόδου των δεδομένων υδραυλικής αγωγιμότητας στο GSLIB

LogHydraulic conductivities

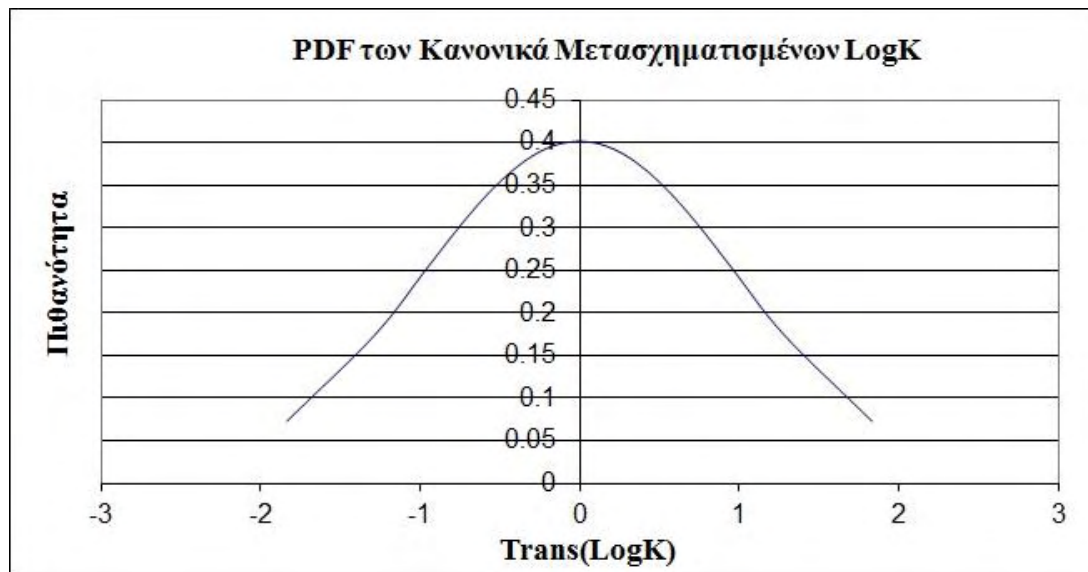
4			
X			
Y			
Z			
LogK			
646465.4	4378039.3	0	-6.697229343
636100	4389500	0	-6.585220655
643202	4370724	0	-6.392892273
644246	4376506	0	-6.063364638
642281.7	4391852.7	0	-5.814846669
636705.3	4382398.7	0	-5.667707596
640758	4378886.7	0	-5.44870632
652600	4364806	0	-5.44870632
632522.3	4380364	0	-5.403120521
653522.2	4370389.9	0	-5.284917884
637576.8	4375595.9	0	-5.150449409
662200	4372300	0	-5.076833126
646900	4372800	0	-5.069483094
656400	4370100	0	-5.048907701
652000	4379250	0	-4.957128198

Στη συνέχεια, οι τιμές αυτές κανονικοποιήθηκαν, με τη χρήση του αλγορίθμου NSCORE (Πίνακας 7.6) κάνοντας έτσι το πεδίο λογοκανονικό μιας και το απαιτεί η SGSIM. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των λογοκανονικών πλέον τιμών φαίνεται στο γράφημα του Σχήματος 7.18.

Πίνακας 7. 6. Αρχείο μετασχηματισμού των λογαριθμικών τιμών σε λογοκανονικές

Parameters for NSCORE			

START OF PARAMETERS:			
C:\GSLIB\LogGSLIB\data\LogK_GSLIB.txt			
4 5		\columns for variable and weight	
-1.0e21 1.0e21		\trimming limits	
0		\1=transform according to specified ref. dist.	
C:\GSLIB\LogGSLIB\data /histsmth/histsmth.out		\file with reference dist.	
1 2		\columns for variable and weight	
C:\GSLIB\LogGSLIB\data\NormLogK_GSLIB.out		\file for output	
C:\GSLIB\LogGSLIB\data \nscore.trn		\file for output transformation table	



Σχήμα 7. 18. Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των λογοκανονικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας

Η γεωστατιστική προσέγγιση ξεκίνησε με την εύρεση του βέλτιστου ημιβαριογράμματος. Η έννοια του βέλτιστου έγκειται στο ότι αυτό προέκυψε μέσω της ρύθμισης του μοντέλου υπόγειας ροής. Εφόσον οι 15 δειγματοληπτικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας θεωρούνται δεδομένες η ρύθμιση του μοντέλου υπόγειας ροής πραγματοποιήθηκε για την ορθή χωρική συσχέτιση που τις χαρακτηρίζει, η οποία θα δώσει εκείνες τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κάθε κελί του καννάβου, ώστε τα προσομοιωμένα υδραυλικά ύψη να συγκλίνουν το καλύτερο δυνατό με τα παρατηρούμενα. Άρα τόσο η εύρεση του ημιβαριογράμματος όσο και η ρύθμιση του MODFLOW αντιμετωπίστηκαν ενιαία από το σύστημα των δύο μοντέλων. Ο κάνναβος για την παρεμβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας προέκυψε από τον αντίστοιχο του MODFLOW, δηλαδή 12500 κελιά διαστάσεων 200 m x 200 m. Χρησιμοποιήθηκε το αρχείο GAMV του GSLIB για την κατάρτιση του πειραματικού ημιβαριογράμματος, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.7.

Πίνακας 7. 7. Αρχείο κατάρτισης πειραματικού ημιβαριογράμματος

Parameters for GAMV	

START OF PARAMETERS:	
C:\GSLIB\LogGSLIB\data\NormLogK_GSLIB.txt	
1 2 3	- columns for X, Y and Z coordinates
4	- columns for variables
-1E+21 1E+21	- trimming limits
c:\GSLIB\LogGSLIB\save\GV_LogK_GSLIB.out	
10	- number of lags
2975.17	- lag separation distance
1487.585	- lag tolerance
1	- number of Directions
0 90 40153.522191056 0 0 10000	-azm, atol, bandh, dip, dtol, bandv
1	- standardize sill? (0=no, 1=yes)

1	- number of variograms
1 1 1	- Tail var, head var, vario type

Το πειραματικό ημιβαριόγραμμα που προέκυψε προσεγγίστηκε από το μοντέλο/θεωρητικό αυτού μέσω μιας σφαιρικής συνάρτησης ως εξής:

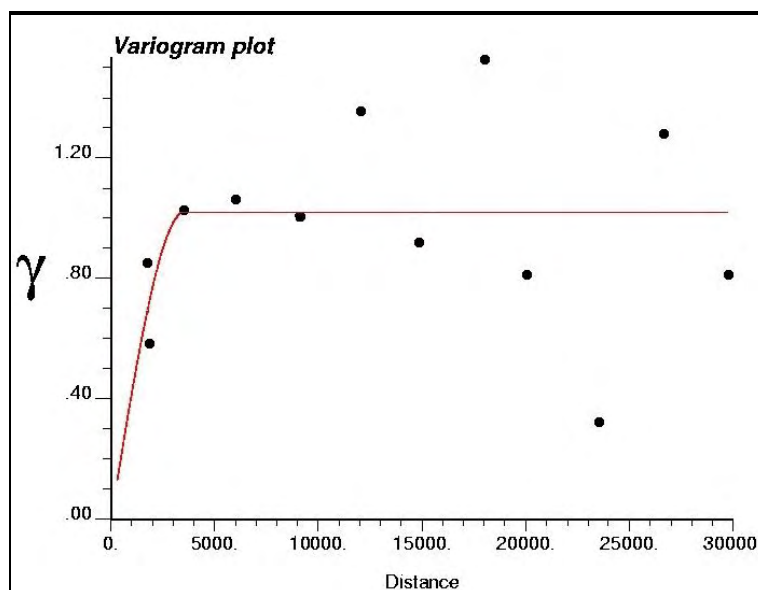
$$\gamma(h) = \begin{cases} 1 * \left[1.5 * \frac{h}{3520} - 0.5 * \left(\frac{h}{3520} \right)^3 \right], & \text{όταν } h \leq 3520 \text{ m} \\ 1, & \text{όταν } h \geq 3520 \text{ m} \end{cases} \quad (\text{Εξ. 7.9})$$

με τη χρήση του αλγορίθμου VMODEL (Πίνακας 7.8). Τόσο το πειραματικό (μαύρες τελείες) όσο και το θεωρητικό (κόκκινη γραμμή) ημιβαριόγραμμα παρουσιάζονται στο γράφημα του Σχήματος 7.19.

Πίνακας 7. 8. Αρχείο κατάρτισης του θεωρητικού ημιβαριογράμματος

Parameters for VMODEL	

START OF PARAMETERS:	
C:\GSLIB\LogK2\save\vmmodel.var	
1 100	-Nb structure, Number of lags
0 0 0.5	
1 0	-nst, nugget NOFILE
1 1.02 0 0 0	-it, cc, ang1, ang2, ang3
3520 3520 3520	-a_hmax, a_hmin, a_vert



Σχήμα 7. 19. Πειραματικό και θεωρητικό ημιβαριόγραμμα

Ακολούθησε η χωρική παρεμβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας με τον αλγόριθμο KT3D, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.9. Στο υποκεφάλαιο 6.5.8 παρουσιάστηκαν οι λόγοι για τη χρήση της απλής Kriging.

Πίνακας 7. 9. Κατάρτιση του αρχείου της μεθόδου Simple Kriging

Parameters for KT3D	

START OF PARAMETERS:	
E:\GSLIB\LogK2\data\NormLogK_GSLIB.txt	
0 1 2 3 4 0	-Columns for DH, X, Y, Z, var, sec var
-1E+21 1E+21	-trimming limits
0	-option: 0=grid, 1=cross, 2=jackknife
C:\GSLIB\LogK2\data\xvk.dat	
1 2 0 3 0	-Columns for X, Y, Z, vr and sec var
3	-debug level (0-3)
C:\GSLIB\LogK2\save\K3_NormLogK_GSLIB.dbg	
C:\GSLIB\LogK2\save\K3_NormLogK_GSLIB.out	
200 627331.6 193.3	-nx, xmin, xsize
200 4357968.165 212	-ny, ymin, ysize
1 0 1	-nz, zmin, zsize
1 1 1	-x, y and z block discretization
0 0	-Min and max data for kriging
32	-Max per octant (0-> not used)
19330 212 25	-Maximum search radii
0 0 0	-Angles for search ellipsoid
0 0	-0=SK, 1=OK, 2=non-st SK, 3=exdrift
0 0 0 0 0 0 0 0	-drift: x,y,z,xx,yy,zz,xy,xz,zy
0	-Variable; 1, estimate; trend
4	-Column number in gridded file
1 0	-nst, nugget NOFILE
1 1.02 0 0 0	-it, cc, ang1, ang2, ang3
3520 3520 3520	-a_hmax, a_hmin, a_vert

Η στοχαστική προσομοίωση της υδραυλικής αγωγιμότητας μέσω της γεωστατιστικής προσέγγισης ολοκληρώνεται με τη χρήση της Ακολουθιακής Κανονικής Προσομοίωσης (SGSIM), όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.10.

Πίνακας 7. 10. Κατάρτιση αρχείου SGSIM για την παραγωγή στοχαστικών πραγματώσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας

Parameters for SGSIM	

START OF PARAMETERS:	
C:\Metaptixiako\Dipolmatiki\GSLIB\LogGSLIB\data\LogK_GSLIB.txt	
1 2 3 4 0 0	-columns for X,Y,Z,vr,wt,sec.var.
-1E+21 1E+21	-trimming limits
1	-transform the data (0=no, 1=yes)
c:\Metaptixiako\Dipolmatiki\GSLIB\LogGSLIB\save\sgsim.trn	

0	-consider ref. dist (0=no, 1=yes)
c:\Metaptixiako\Dipolmatiki\GSLIB\LogGSLIB\data\histsmth.out	
1 2	-columns for vr and wt
-7 -4	-zmin,zmax (tail extrapolation)
1 -7	-lower tail option
1 -4	-upper tail option
1	-debug level (0-3)
c:\Metaptixiako\Dipolmatiki\GSLIB\LogGSLIB\save\SGS_LogK_GSLIB.dbg	
c:\Metaptixiako\Dipolmatiki\GSLIB\LogGSLIB\save\SGS_LogK_GSLIB.out	
100	-number of realizations to generate
200 627331.6 193.3	-nx, xmin, xsize
200 4357968.16 212	-ny, ymin, ysize
1 0 1	-nz, zmin, zsize
69069	-random number seed
0 8	-Min and max original data for sim
32	-number of simulated nodes to use
1	-assign data to nodes (0=no, 1=yes)
0 1	-multiple grid search (0=no, 1=yes), num
0	-maximum data per octant (0=not used)
19330 212 25	-maximum search radii (hmax, hmin, vert)
0 0 0	-angles for search ellipsoid
388 424 1	-size of covariance lookup table
0 0 1	-kType: 0=SK,1=OK,2=LVM,3=EXDR,4=COLC
c:\Metaptixiako\Dipolmatiki\GSLIB\LogGSLIB\data\ydata.dat	
1	-column
1 0	-nst, nugget NOFILE
1 1.02 0 0 0	-it, cc, ang1, ang2, ang3
3520 3520 3520	-a_hmax, a_hmin, a_vert

Παρήχθησαν 100 εξαρτημένοι ισοπίθανοι χάρτες της υδραυλικής αγωγιμότητας. Η διαδικασία της παραγωγής εξαρτημένων στοχαστικών πραγματώσεων περιγράφηκε από τον Journel (1974), ως εξής:

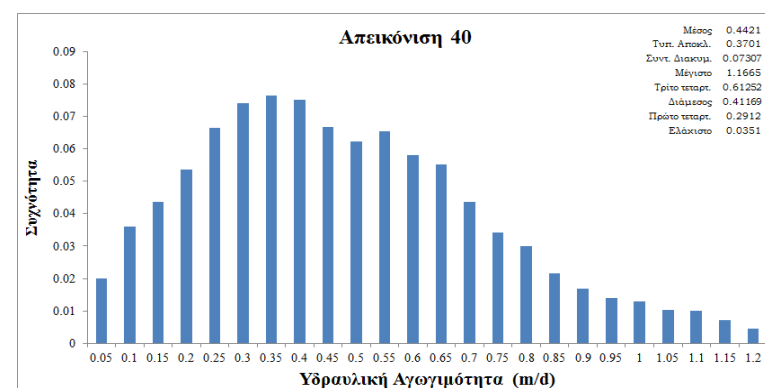
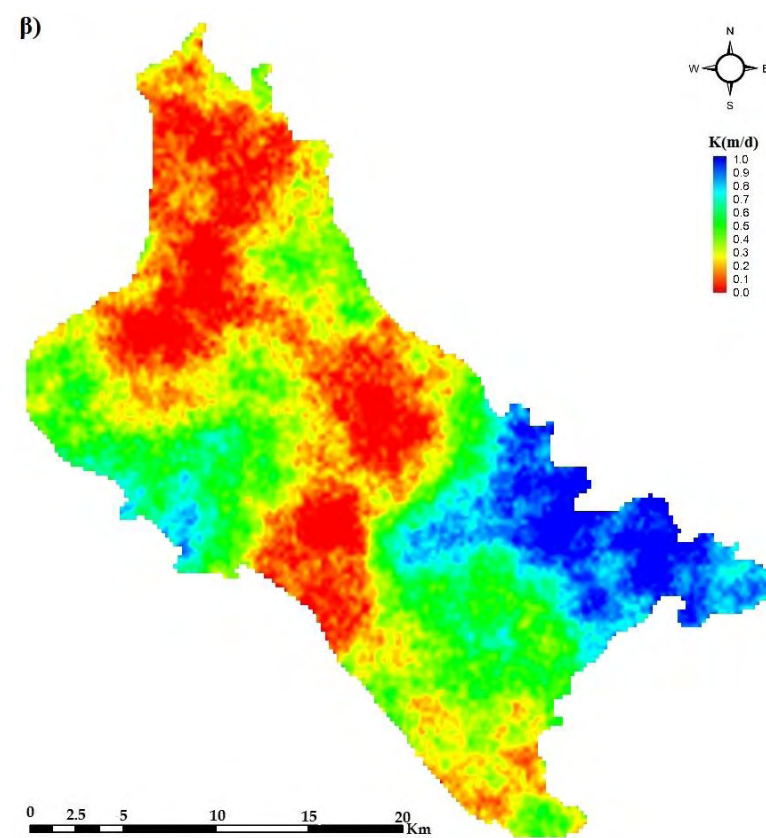
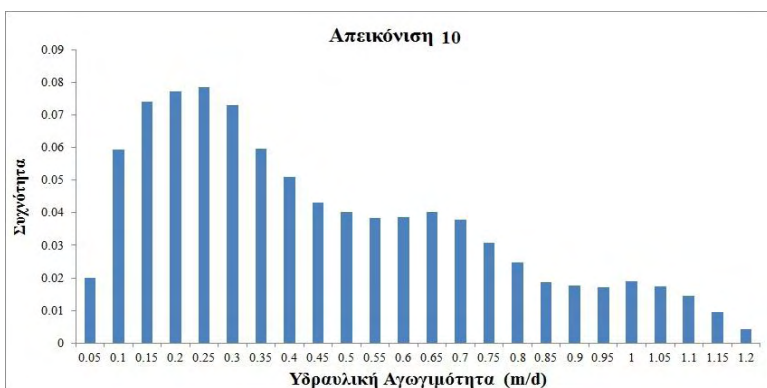
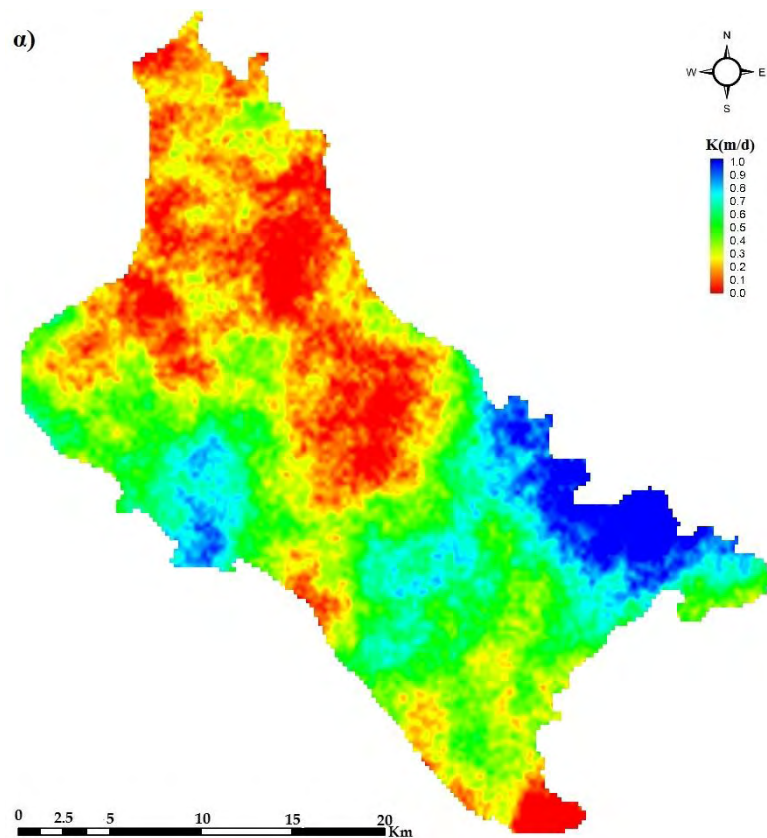
- με τις γνωστές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κάποια σημεία του πεδίου, χρησιμοποιήθηκε η απλή Kriging και δόθηκαν τιμές αυτής σε κάθε κελί του καννάβου
- πραγματοποιήθηκε αρχικά μια μη-εξαρτημένη προσομοίωση της υδραυλικής αγωγιμότητας για κάθε κελί
- επιλέχθηκαν οι τιμές των K από την παραπάνω μη-εξαρτημένη προσομοίωση στις θέσεις που υπήρχαν τα δεδομένα και χρησιμοποιήθηκε η απλή Kriging δίνοντας επίσης ένα χάρτη με τιμές K σε κάθε κελί
- υπολογίστηκε η διαφορά των τιμών της K, που προέκυψαν από τη μη-εξαρτημένη προσομοίωση, από αυτές που προέκυψαν από την τελευταία απλή Kriging, για κάθε κελί

- προστέθηκαν αυτές οι διαφορές στις τιμές της K του αρχικού απλής Kriging, με τις τιμές όμως των δεδομένων να παραμένουν οι ίδιες.

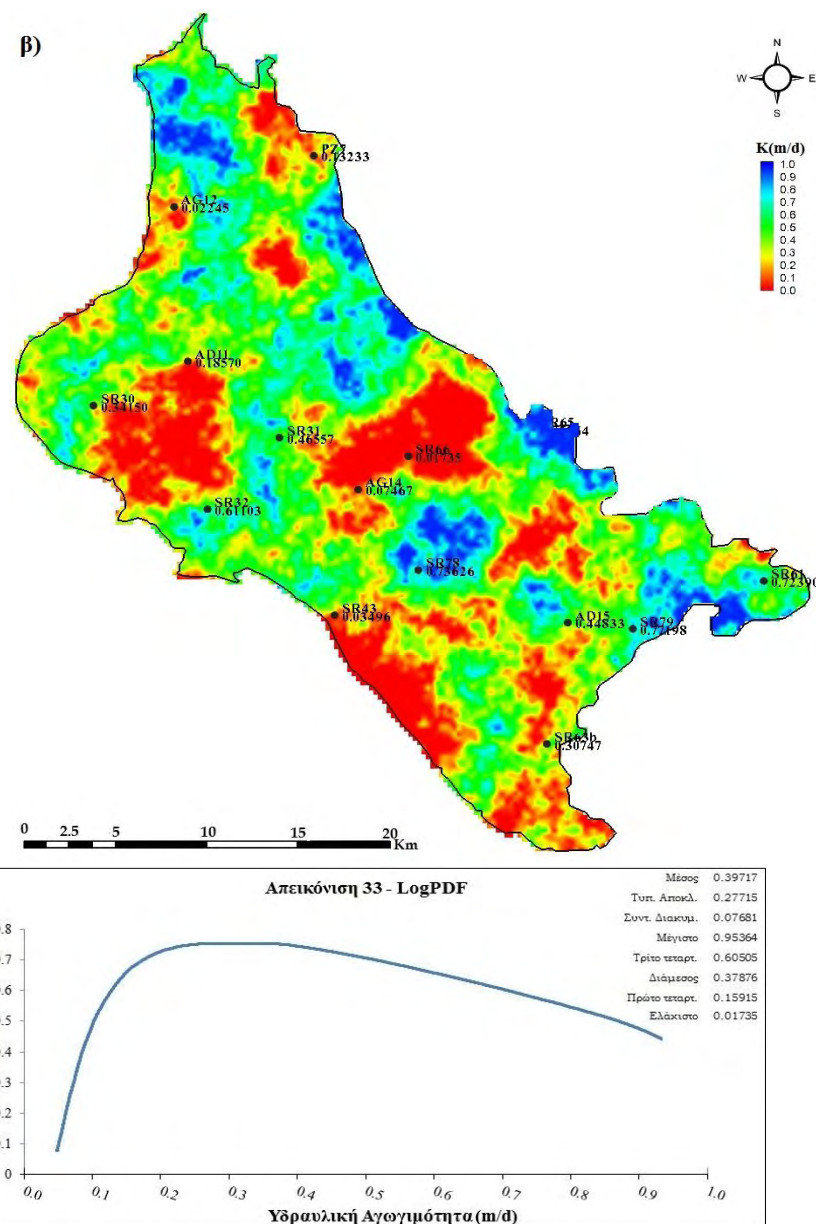
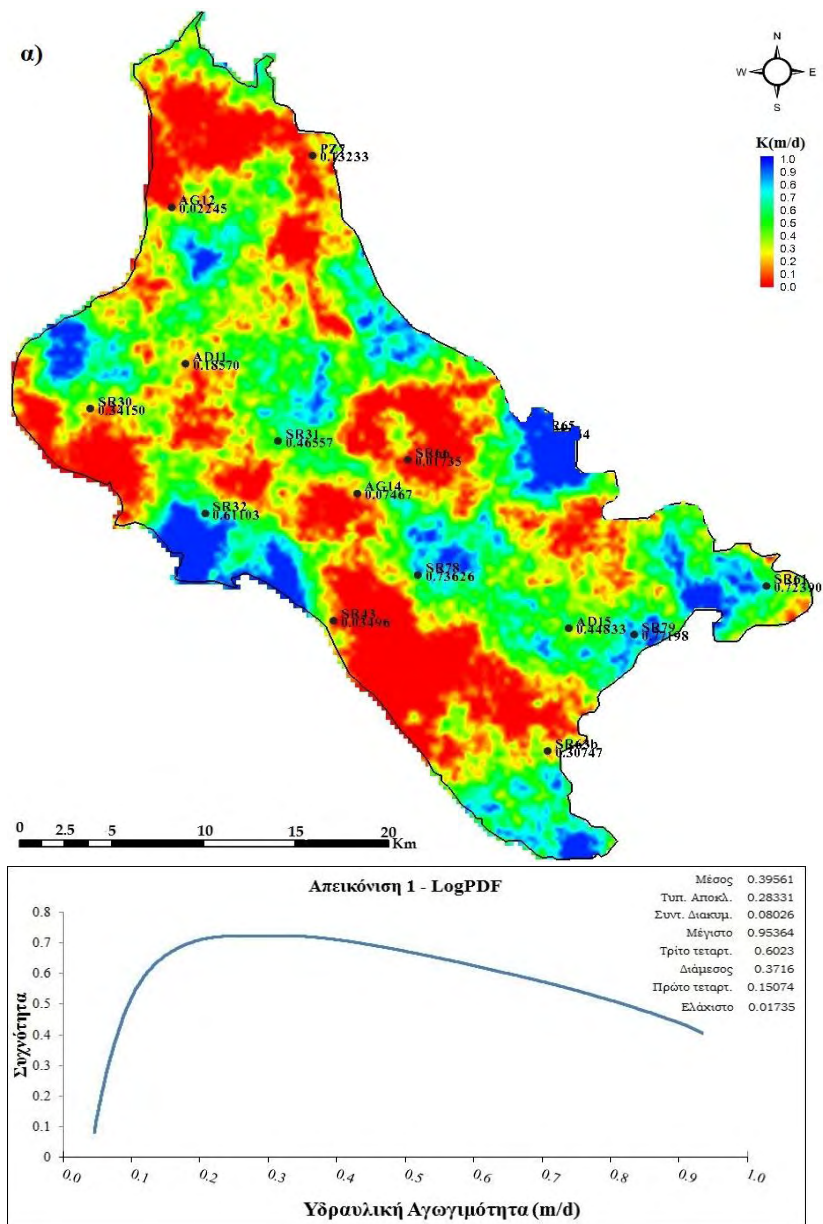
Ο αριθμός των 100 πραγματώσεων μπορεί να κρίνεται μικρός, αλλά με βάση το υποκεφάλαιο 2.3.3 τόσο η παραγωγή του ημιβαριογράμματος μέσω της ρύθμισης του MODFLOW, όσο και η χρήση της εξαρτημένης προσομοίωσης καθιστούν τον αριθμό ικανοποιητικό όπως θα αποδειχθεί και στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η αξιοπιστία της προσομοίωσης κρίνεται ικανοποιητική όσο οι δύο πρώτες στατιστικές ροπές τους και οι κατανομές τους συγκλίνουν με τα αντίστοιχα των δεδομένων. Από τους 100 χάρτες, παρουσιάζονται τέσσερις εξ' αυτών, ώστε να ελεγχθεί η παραπάνω προϋπόθεση.

Παρόλο αυτά, πραγματοποιήθηκε έλεγχος για την ευστάθεια της Monte Carlo προσομοίωσης με την επιλογή 50 πραγματώσεων και 200. Στα σχήματα 7.20 και 7.21 παρουσιάζονται τόσο οι χάρτες της κατανομής της υδραυλικής αγωγιμότητας στο πεδίο και το ιστόγραμμα της συχότητας των παραγόμενων τιμών για την απεικόνιση 10 και 50 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα δεν κρίνονται ικανοποιητικά, τόσο ως προς την χωρική τους κατανομή, όσο και ως προς τα στατιστικά στοιχεία αυτών, μιας και το ιστόγραμμα των αποτελεσμάτων απέχει κατά πολύ από αυτών των δεδομένων. Η περίπτωση των 200 πραγματώσεων έδωσε αξιόπιστα αποτελέσματα, τα οποία ελάχιστη διαφορά είχαν από αυτά των 100. Το ίδιο ισχύει και ως προς τα αποτελέσματα των υδραυλικών υψών, έπειτα από την εφαρμογή του μοντέλου υπόγειας ροής. Η περίπτωση των 200 πραγματώσεων απορίφθηκε αξιολογώντας τα αποτελέσματα της στοχαστικής βελτιστοποίησης. Παρατηρήθηκε ελάχιστη μείωση της οικονομικής αβεβαιότητας, (Σχήμα 8.5.β) οπότε για λόγους οικονομίας χρόνου δεν υπήρχε λόγος να αυξηθεί περαιτέρω ο αριθμός των 100 πραγματώσεων.

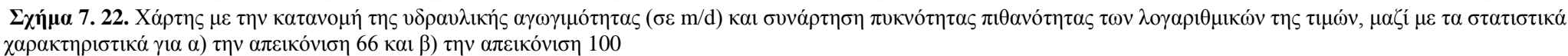
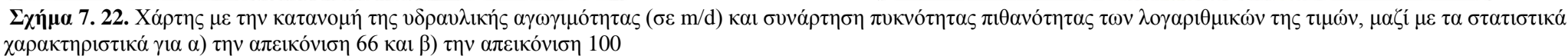
Στα Σχήματα 7.22 και 7.23 παρουσιάζονται ο χάρτης της κατανομής της υδραυλικής αγωγιμότητας (σε m/d), η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των λογαριθμικών τιμών του και τα στατιστικά χαρακτηριστικά του πεδίου τιμών του (σε m/d) για 4 στοχαστικές πραγματώσεις. Για θέμα αντικειμενικότητας επιλέχθηκαν οι πραγματώσεις 1, 33, 66 και 100. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των αποτελεσμάτων είναι ικανοποιητικά κοντά στα αντίστοιχα των δεδομένων. Το ίδιο ισχύει και για τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των λογαριθμικών τιμών τόσο των δεδομένων όσο και των αποτελεσμάτων. Τα δύο παραπάνω συμπεράσματα καθιστούν την στοχαστική προσομοίωση αξιόπιστη ως προς τα αποτελέσματά της.



Σχήμα 7. 20. Χάρτης με την κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας (σε m/d) και ιστόγραμμα εμφάνισης, μαζί με τα στατιστικά χαρακτηριστικά για α) την απεικόνιση 10 και β) την απεικόνιση 40.



Σχήμα 7. 21. Χάρτης με την κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας (σε m/d) και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των λογαριθμικών της τιμών, μαζί με τα στατιστικά χαρακτηριστικά για α) την απεικόνιση 1 και β) την απεικόνιση 33



7.5. Προσομοίωση της υπόγειας ροής

Η προσομοίωση του υπόγειου κοκκώδους φρεάτιου υδροφορέα της Κάρλας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του μαθηματικού κώδικα MODFLOW του εμπορικού προγράμματος GMS, μέσω της εννοιολογικής προσέγγισης. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα εξής:

- Κατάρτιση της γεωμετρίας του υπόγειου υδροφορέα (αδιαπέρατο υπόβαθρο, τοπογραφικό ανάγλυφο και επιλογή στρωμάτων (layer)) και του τρισδιάστατου καννάβου (αριθμός κελιών και διαστάσεις αυτών)
- Καθορισμός των οριακών συνθηκών
- Καθορισμός των εισροών και εκροών (κατείσδυση, διαφυγές λίμνης, αντλήσεις)
- Καθορισμός των υδρογεωλογικών παραμέτρων (υδραυλική αγωγιμότητα, συντελεστής αποθηκευτικότητας και απόδοσης)
- Καθορισμός των αρχικών συνθηκών (αρχικά υδραυλικά ύψη)

Ακολουθεί η ανάλυση των παραπάνω βημάτων

7.5.1. Κατάρτιση της γεωμετρίας του υπόγειου υδροφορέα και του καννάβου

Παρουσιάστηκαν τρεις τύποι υδροφόρων σχηματισμών στο υποκεφάλαιο 5.5.1, ο ένας τοποθετημένος πάνω στον άλλο. Λόγω της καλής υδραυλικής επικοινωνίας των δύο ανώτερων - αργιλοαμμωδών λιμναίων αποθέσεων και των αδρομερών κροκαλολατυποπαγών – και της πολύ μικρής υδραυλικής επικοινωνίας του δεύτερου με τον τρίτο - των μαρμάρων - θεωρήθηκαν οι δύο άνω ως ένα στρώμα και προσομοιώθηκαν ως ένα κατακόρυφο layer στο MODFLOW. Έτσι ο υδροφόρος σχηματισμός των μαρμάρων δε λήφθηκε υπόψη. Άλλωστε οι αρδευτικές γεωτρήσεις του κάμπου δεν εκμεταλλεύονται υπόγεια νερά από αυτόν λόγω του μεγάλου του βάθους. Επομένως το υπόβαθρο του υπόγειου υδροφορέα συμπίπτει με το υπόβαθρο των αδρομερών κροκαλολατυποπαγών σχηματισμών. Υπήρχε αρκετή πληροφορία για τον καθορισμό του από τον χάρτη 5.3.2 της μελέτης της SOGREAH-Grénoble (1974). Το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης ήταν έτοιμο από το ΨΜΕ του GIS. Μένει να καθοριστεί το πλέγμα του καννάβου, για το οποίο όμως ελήφθησαν υπόψη δύο σημαντικοί παράγοντες:

- Η βέλτιστη σύζευξη με το μοντέλο επιφανειακής απορροής
- Η πυκνότητα των πηγαδιών άντλησης

Στη νότια και νοτιοδυτική περιοχή του πεδίου μελέτης οι θέσεις των αρδευτικών γεωτρήσεων ήταν τόσο πυκνές, που σε κάποιες περιπτώσεις οι μεταξύ τους αποστάσεις δεν ξεπερνούσαν τα 100 m. Αυτό ανάγκαζε σε μεγάλη πύκνωση τον κάνναβο με διάσταση κελιών 100 m x 100 m. Από την άλλη, η διάσταση του κελιού στην κατανεμημένη μορφή του μοντέλου επιφανειακής απορροής ήταν 1km x 1km, γεγονός

που χαλάρωνε τις απαιτήσεις των διαστάσεων των κελιών του MODFLOW. Παρόλα αυτά τρεις επιλογές εξετάστηκαν: i) 100 m x 100 m, ii) 200 m x 200 m και iii) 400 m x 400 m. Τόσο η ρύθμιση των τριών δομών, όσο και η σύζευξη τους με το UTHBAL ήταν ικανοποιητικές (Loukas et al., 2008a), γεγονός που οι δύο αυτοί λόγοι δεν μπορούσαν να οδηγήσουν στην επιλογή της καταλληλότερης δομής. Ο υπολογιστικός όμως κόπος και χρόνος που απαιτούνταν για τη δόμηση και εφαρμογής της δομής 100 m x 100 m, την καθιστούσαν ακατάλληλη, πόσο μάλλον σε περίπτωση στοχαστικής προσομοίωσης. Επιλέχθηκε λοιπόν η δομή των 200 m x 200 m μιας και η αντίστοιχη των 400 m x 400 m, ήταν αρκετά αραιή για να συμπεριλάβει τις αρδευτικές γεωτρήσεις. Η περίπτωση της μεγάλης πύκνωσης των γεωτρήσεων αντιμετωπίστηκε με δύο τρόπους:

- πύκνωση του καννάβου σε αυτές τις περιοχές, μια δυνατότητα που το μοντέλο παρέχει και
- αντικατάσταση δύο ή τριών το πολύ γεωτρήσεων με μία, μιας και ήταν αδύνατο να συνυπάρξουν παραπάνω από μια στο ίδιο κελί

Σχηματίστηκε έτσι κάνναβος 12500 κελιών με διάσταση 200 m x 200 m.

7.5.2. Καθορισμός των οριακών συνθηκών

Στο υποκεφάλαιο 5.5, στο οποίο παρουσιάστηκε η υδρογεωλογία της λεκάνης βασιζόμενη σε προηγούμενες μελέτες, δόθηκε ιδιαίτερη μνεία στις οριακές συνθήκες του φρεάτιου υδροφορέα. Στα ανατολικά, παρά την παρουσία καρστικών σχηματισμών σε ανώτερα εδάφη, η ασυμφωνία των παρατηρήσεων στάθμης έδειξε την ύπαρξη μη υδραυλικής επικοινωνίας των καρστικών υδροφορέων με τον κοκκώδη. Οι καρστικοί σχηματισμοί του Μαυροβουνίου δεν συναντώνται στα βάθη του υπόγειου υδροφορέα, αλλά πιο ψηλά, στο ίδιο ύψος με το ανάγλυφο της περιοχής. Όσοι όμως σχηματισμοί υφίστανται στο πεδινό τμήμα είναι τοποθετημένοι αρκετά κάτω από τις προσχώσεις. Τόσο η μελέτη της SOGREAH–Grenoble (1974), όσο και άλλοι μελετητές (Κωνσταντινίδης και Περγαλιώτης, 1984; Μπεζές, 2004) καταλήγουν στο ίδιο συμπέρασμα. Αυτό λοιπόν καθιστά την ισχύ της οριακής συνθήκης τύπου Newman στο ανατολικό και νοτιοανατολικό όριο του υπόγειου υδροφορέα.

Στα δυτικά, όμως, η κατάσταση αλλάζει μιας και η παρουσία υδροπερατών σχηματισμών σε όλο το δυτικό σύνορο καθιστά δυνατή την υδραυλική επικοινωνία του υπόγειου υδροφορέα με τις γειτονικές υδροφορίες σε όλο το δυτικό μέτωπο. Μάλιστα στο βορειοδυτικό μέτωπο, όπου συνεχίζεται ο κάμπος της Αν. Θεσσαλίας εντοπίζεται γειτονικό υπόγειο υδατικό σύστημα, αλλά η σύγκριση των υδραυλικών υψών καταδεικνύει μικρή υδραυλική επικοινωνία. Τόσο στη μελέτη της SOGREAH–Grenoble (1974), όσο και τους Κωνσταντινίδη και Περγαλιώτη (1984), αναφέρεται πως αυτή η δυσκολία οφείλεται στις προσχώσεις που δημιουργήσαν τα ρέματα των βορειοδυτικών λόφων του Χαλκοδόνιου Όρους, τα οποία πηγάζουν από την ορεινή περιοχή της Αγναντεράς και της Μύρας και καταλήγουν μέσω της Νίκαιας και της Χάλκης στη Λάρισα με σημαντικότερο το διευθετημένο Κουσμπασανιώτικο ρέμα.

Αυτός είναι και ο λόγος που ο γειτονικός αυτός υδροφορέας, ενώ ένα τμήμα του βρίσκεται εντός των ορίων της λεκάνης της Κάρλας, δεν συμπεριλήφθηκε στο υπόγειο υδατικό σύστημα αυτής. Μάλιστα ο γειτονικός υδροφορέας είναι πιο πλούσιος σε υδροφορία και η όποια ροή πραγματοποιείται τροφοδοτώντας αυτόν της Κάρλας. Επομένως, οι συνθήκες που εντοπίζονται σε όλο το δυτικό όριο είναι τύπου Cauchy και προσομοιώθηκαν από το MODFLOW με το πακέτο General Head Boundary.

7.5.3. Καθορισμός εισροών και εκροών

Οι εισροές στον υπόγειο υδροφορέα οφείλονται στην κατείσδυση από τη βροχόπτωση, η οποία υπολογίζεται σε μηνιαίο βήμα από το UTHRL, τις πλευρικές εισροές από γειτονικούς υδροφόρους σχηματισμούς του δυτικού ορίου και τις διαφυγές του ταμιευτήρα, οι οποίες υπολογίστηκαν από το LAK3. Οι όγκοι αυτών θα παρουσιαστούν στα αποτελέσματα του MODFLOW, στον πίνακα υδατικού ισοζυγίου.

Οι εκροές οφείλονται κυρίως στην άντληση για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών. Ιδιαίτερη μνεία έγινε στο Κεφάλαιο 5 στην ανεξέλεγκτη υπεράντληση των υπόγειων υδάτων, μιας και η λεκάνη είναι αγροτική και στο γεγονός πως εξαιτίας αυτής της χρόνιας κατάστασης έχει υποβαθμιστεί ποσοτικά ο υπόγειος υδροφορέας. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν και τα είδη των καλλιεργειών και οι εκτάσεις τους. Οι εκτιμήσεις των αρδευτικών αναγκών των καλλιεργειών πραγματοποιήθηκαν με τον δείκτη Near Irrigation Requirement (NIR) (USDA, 1970) μέσω της εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοή της κάθε καλλιέργειας ET_c , λαμβάνοντας όμως υπόψη τις απώλειες τόσο κατά τη διανομή, όσο και κατά την εφαρμογή (Μπακαλιάνος, 2010). Για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής επιλέχθηκε η μέθοδος Blanney-Criddle. Στις ανάγκες αυτές προστέθηκαν και οι καταναλώσεις για αστική, κτηνοτροφική και βιομηχανική χρήση (Γεωργοτεχνική Μελέτη Κάρλας, 2004).

Λόγω της ιδιαιτερότητας ορισμένων περιοχών, το πεδίο μελέτης χωρίστηκε σε επτά αρδευτικές ζώνες, οι οποίες είναι:

- Η ζώνη 1 εκτάσεως περίπου 36267 στρεμμάτων περιλαμβάνει την περιοχή ανατολικά των χωριών Στεφανοβίκειου – Ριζόμυλου – Βελεστίνου. Η άντληση από τον υπόγειο υδροφορέα κυμαίνεται από $21.4 \cdot 10^6$ έως $28.4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως. Στη ζώνη αυτή υφίσταται και το μικρό δίκτυο του ΤΟΕΒ Κάρλας, στο οποίο όμως, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5, η άρδευση των καλλιεργειών γίνεται μόνο από υπόγεια νερά. Επίσης, από τη ζώνη αυτή τροφοδοτείται με νερό η πόλη του Βόλου, με τη λειτουργία δέκα γεωτρήσεων σημαντικής δυναμικότητας. Η ζώνη αυτή ανήκει στην περιοχή της τρίτης ομάδας πιεζομέτρων – όπως παρουσιάστηκε στο πέμπτο κεφάλαιο – στην οποία η πτώση είναι μεγάλη και έντονη. Οι παροχές των γεωτρήσεων είναι αρκετά μεγάλες, ώστε σε περιόδους ύφεσης να αντλούν $100 \text{ m}^3/\text{h}$, ενώ έχουν καταγραφεί παροχές της τάξεως των $200 \text{ m}^3/\text{h}$ σε περιόδους αιχμής. Σε αυτήν τη ζώνη πρόκειται να εγκατασταθούν οι νέες γεωτρήσεις ύδρευσης και στα πλαίσια

του έργου ανασύστασης της Κάρλας θα καταργηθούν όλες οι αρδευτικές γεωτρήσεις.

- Η ζώνη 2 εκτάσεως 14910 στρεμμάτων περιλαμβάνει τα Δ-ΝΔ περιθώρια της ζώνης 1 με όριο τη νοητή γραμμή μεταξύ των χωριών Μέγα Μοναστήρι – Χλόη – Βελεστίνο - Αγ. Γεώργιος. Η άντληση από τον υπόγειο υδροφορέα κυμαίνεται από $3 \cdot 10^6$ έως $4.2 \cdot 10^6$ m³ ετησίως. Ανήκει και αυτή στην τρίτη ομάδα πιεζομέτρων. Οι παροχές των γεωτρήσεων δεν είναι μεγάλες, με αυτές να φτάνουν σε ώρες ύφεσης τα 30 m³/h και σε ώρες αιχμής να μην ξεπερνούν τα 100 m³/h.
- Οι ζώνες 3 και 5 περικλείουν την περιοχή που οριοθετείται από τα χωριά Κανάλια – Στεφανοβικείου – Σωτήριου – και νοτίως Καλαμακίου, εκτάσεως 79931 στρεμμάτων. Αναπτύσσονται μικρού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες στις σύγχρονες αποθέσεις. Ανήκουν στη δεύτερη ομάδα πιεζομέτρων, στην οποία η πτώση είναι μεγάλη, αλλά όχι έντονη. Στις δύο αυτές ζώνες, εξ αιτίας του μικρού γενικά δυναμικού των υπογείων υδροφοριών οι παροχές άντλησης των γεωτρήσεων δεν είναι μεγάλες. Έτσι στη ζώνη 3, η άντληση από τον υπόγειο υδροφορέα κυμαίνεται από $5.5 \cdot 10^6$ έως $6.3 \cdot 10^6$ m³ με παροχή γεωτρήσεων στα 35 m³/h σε ώρες μη αιχμής και στα 105 m³/h ώρες αιχμής. Στη ζώνη 5 η άντληση από τον υπόγειο υδροφορέα κυμαίνεται από $3.3 \cdot 10^6$ έως $3.9 \cdot 10^6$ m³ με παροχή γεωτρήσεων στα 20 m³/h σε ώρες ύφεσης και στα 60 m³/h ώρες αιχμής.
- Η ζώνη 4 περιλαμβάνει τον κώνο του ρέματος Ξεριά και των άλλων ρεμάτων στην περιοχή Καναλιών, εκτάσεως 15000 στρεμμάτων. Ανήκει και αυτή στην δεύτερη ομάδα πιεζομέτρων. Οι δεινρόδεις καλλιέργειες υπερισχύουν στη ζώνη αυτή. Αντλούνται από τα υπόγεια νερά περίπου $2 \cdot 10^6$ έως $2.8 \cdot 10^6$ m³. Οι γεωτρήσεις δίνουν μικρές παροχές της τάξεως των 20 m³/h σε ώρες ύφεσης 70 m³/h ώρες αιχμής.
- Η ζώνη 6 οριοθετείται από τα χωριά - νοτίως του Καλαμακίου – Αρμένιο – Σωτήριο – Νίκη – Αχίλλειον – Γλαύκη – Ελευθέριο – Δήμητρα και Νεοχώρι. Έχει έκταση 210263 στρεμμάτων και το βόρειο τμήμα της ανήκει στην πρώτη ομάδα πιεζομέτρων, ενώ το νότιο στη δεύτερη. Είναι η περιοχή η οποία αρδεύεται από το ΤΟΕΒ Πηνειού. Επομένως, περίπου $20 \cdot 10^6$ m³ καλύπτονται ετησίως από το δίκτυο αυτό, μέσω των ταμιευτήρων άρδευσης. Έτσι, η ποσότητα που αντλείται κυμαίνεται από $35.5 \cdot 10^6$ m³ έως $42.5 \cdot 10^6$ m³. Οι παροχές των γεωτρήσεων κυμαίνονται από 80 m³/h έως και 200 m³/h.
- Η ζώνη 7, εκτάσεως 143840 στρεμμάτων, αποτελεί την πιο υποβαθμισμένη ποσοτικά περιοχή της πεδιάδας της Κάρλας. Οι ανάγκες για άρδευση και ύδρευση καλύπτονται αποκλειστικά από γεωτρήσεις. Ανήκει στην τρίτη ομάδα πιεζομέτρων και οι μεγαλύτερες ταπεινώσεις, που συναντώνται τους καλοκαιρινούς μήνες φτάνουν και τα 100 m. Αυτό όμως οφείλεται στο γεγονός ότι το βάθος του υδροφορέα είναι αρκετά μεγάλο, μιας και από τη μελέτη της

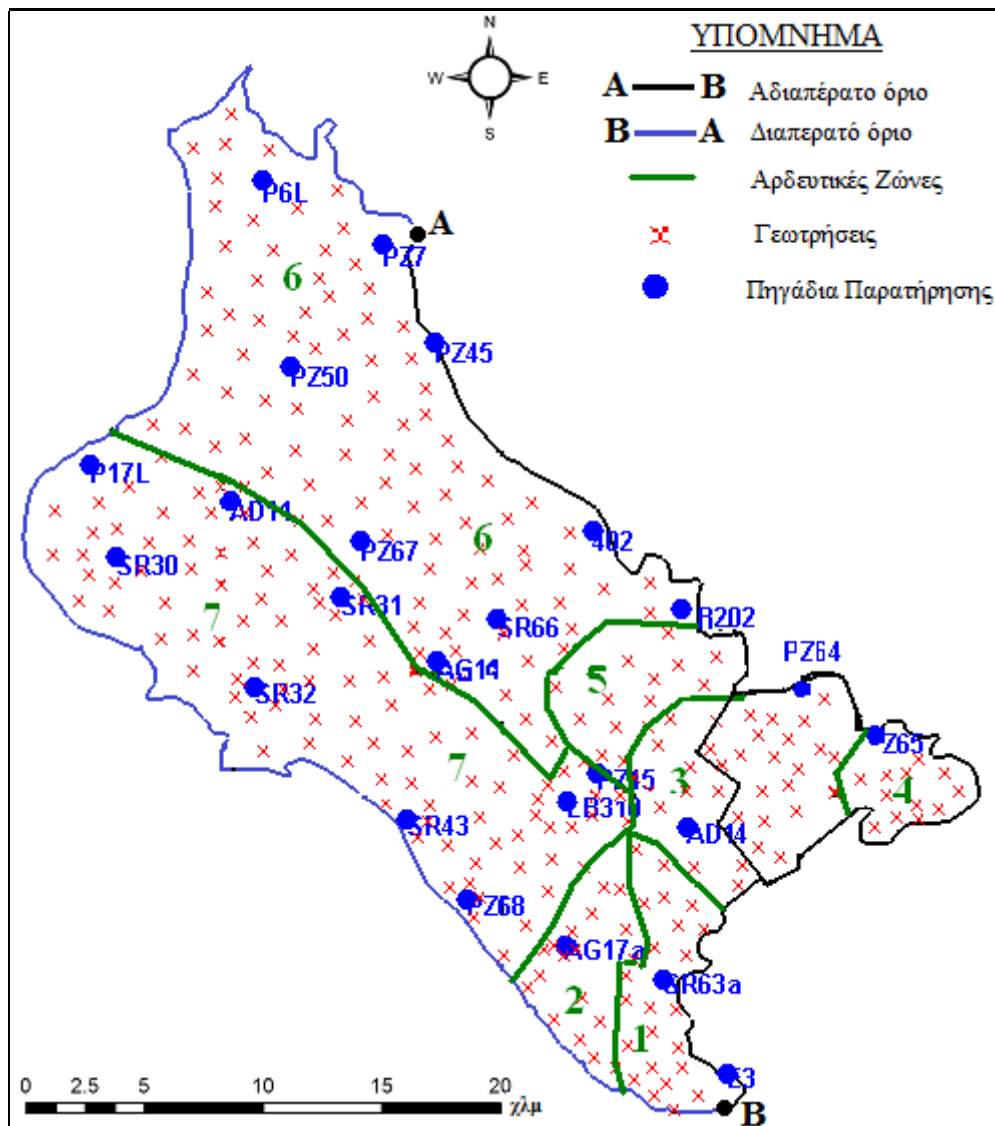
SOGREAH–Grenoble 1974, ο αδιαπέρατος πυθμένας φτάνει στα -550 m (απόλυτο υψόμετρο). Αντλούνται από $53 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ έως $61 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Οι παροχές των γεωτρήσεων κυμαίνονται από 80 m³/h έως και 200 m³/h.

Οι διακυμάνσεις του αντλούμενου από τον υπόγειο υδροφορέα όγκο οφείλονται στις μεταβολές των καλλιεργειών που παρατηρήθηκαν στην περίοδο 1987-2012. Ήδη είχε τονισθεί στο Κεφάλαιο 5 πως την τελευταία δεκαετία η καλλιέργεια των σιτηρών ολοένα και αυξανόταν εις βάρος του βαμβακιού. Στον Πίνακα 7.11 δίνονται οι ετήσιες αντλήσεις από τον υπόγειο υδροφορέα όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Πίνακας 7. 11. Εύρος των ετήσιων όγκων του υπόγειου αντλούμενου νερού (σε hm³) για κάθε ζώνη και για κάθε χρήση

			Ζώνη 1	Ζώνη 2	Ζώνη 3	Ζώνη 4	Ζώνη 5	Ζώνη 6	Ζώνη 7
Αντληση υπόγειου νερού (hm³) 1987-2012	Άρδευση - Κτηνοτροφία		19-26	3-4.2	5.5-6.3	1.8-2.6	3-3.6	35-42	52-60
		ΔΕΥΑΜΒ	2.1	0	0	0	0	0	0
	Υδρευση	Τοπ. Οικισμοί	0.3	0	0	0.2	0.3	0.5	1
		Σύνολο	21.4-28.4	3-4.2	5.5-6.3	2-2.8	3.3-3.9	35.5-42.5	53-61

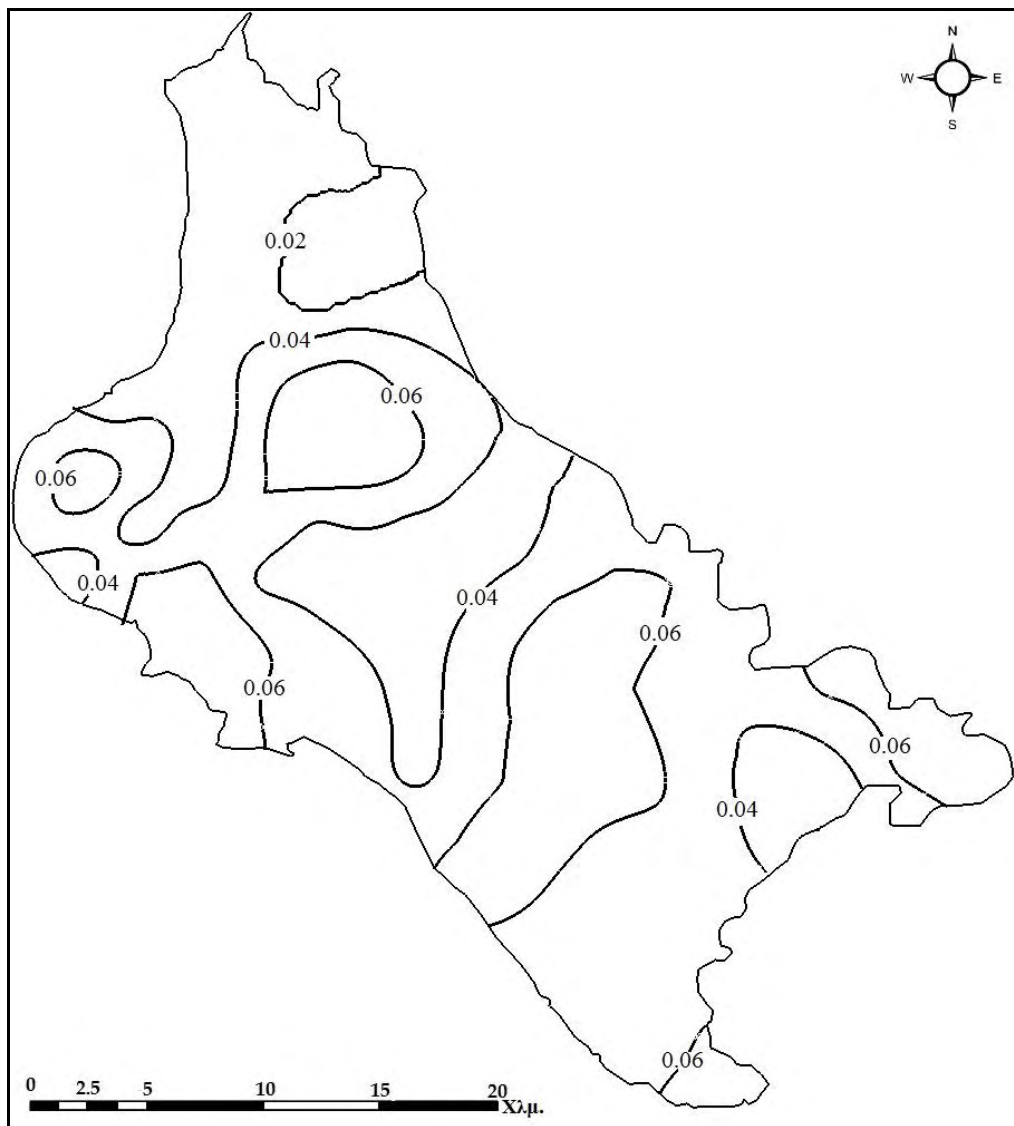
Στον χάρτη του Σχήματος 7.23 παρουσιάζονται οι ζώνες αυτές μαζί με τις οριακές συνθήκες και τις γεωτρήσεις.



Σχήμα 7. 23. Οριακές συνθήκες, γεωτρήσεις, αρδευτικές ζώνες και πηγάδια παρατήρησης του μοντέλου υπόγειας ροής

7.5.4. Καθορισμός υδρογεωλογικών παραμέτρων

Προηγουμένως παρουσιάστηκε πως προσεγγίστηκε η κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας. Δυστυχώς η πληροφορία για τις υπόλοιπες παραμέτρους ήταν ελλιπέστατη και μοναδική πηγή ήταν η μελέτη της SOGREAH- Grénoble (1974). Οι Κωνσταντινίδης και Περγαλιώτης (1984) στηρίχθηκαν και αυτοί στη μελέτη της SOGREAH- Grénoble (1974) για τις τιμές του συντελεστή αποθηκευτικότητας και απόδοσης. Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας κυμαίνεται από 0.02 έως 0.08 (Σχήμα 7.24) ενώ ο συντελεστής απόδοσης είναι ενιαίος και ίσος με 0.1, το οποίο αντιστοιχεί στη μέση τιμή ανάμεσα στη λεπτή άμμο και την άργιλο σύμφωνα με τον Johnson (1967).



Σχήμα 7. 24. Κατανομή του συντελεστή αποθηκευτικότητας στο πεδίο μελέτης

7.5.5. Καθορισμός των αρχικών συνθηκών

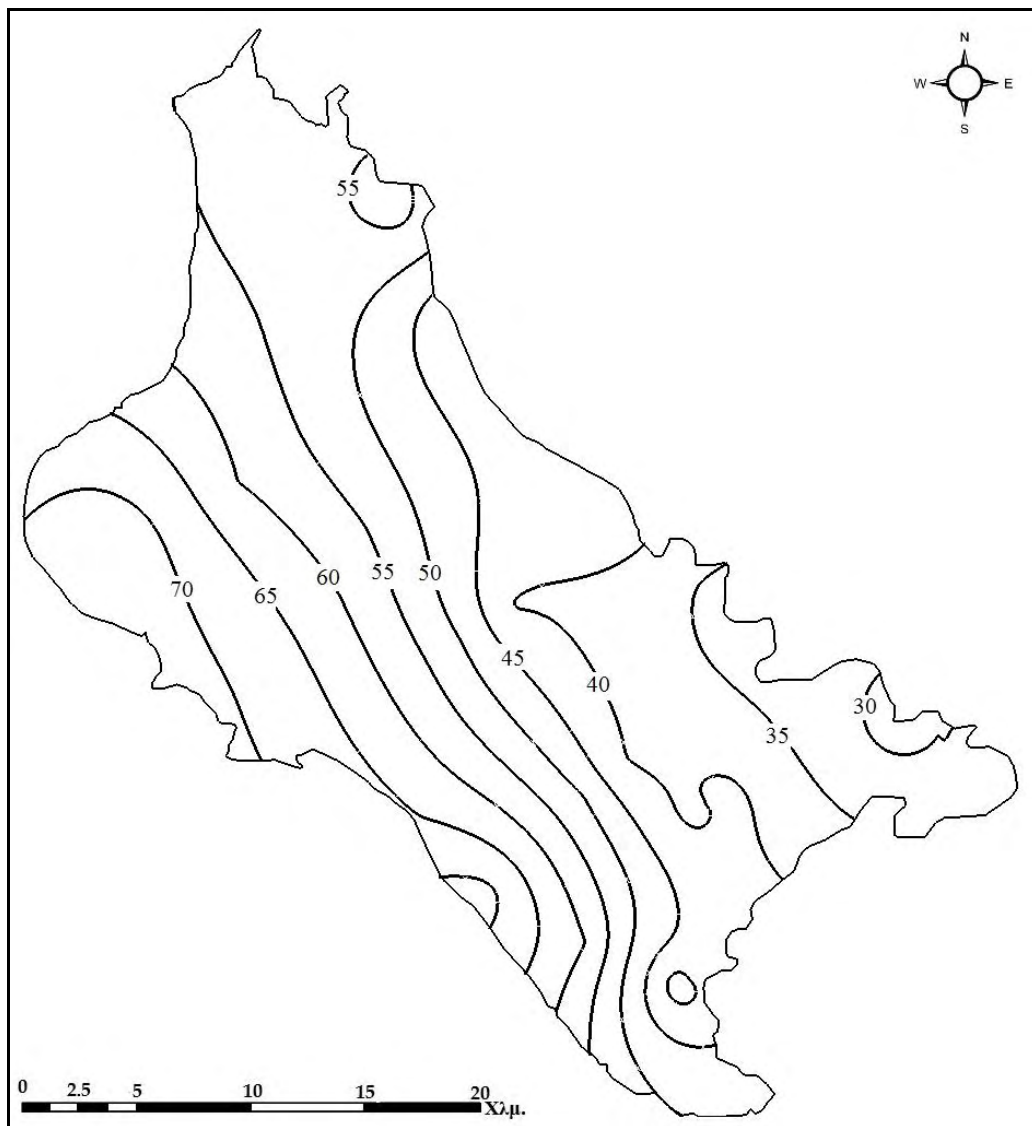
Για τον καθορισμό των αρχικών συνθηκών χρησιμοποιήθηκαν οι στάθμες παρατήρησης από 24 πηγάδια παρατήρησης για την αρχή του έτους 1987 (Πίνακας 7.12). Η επιλογή αυτού του έτους έγινε με γνώμονα δύο σημαντικά κριτήρια:

- Από τη χρονοσειρά των υδραυλικών υψών του υπόγειου υδροφορέα της Κάρλας, μέχρι αυτήν την περίοδο, δεν παρατηρούνται πτωτικές τάσεις. Μάλιστα από το διάγραμμα του Σχήματος 5.11 φαίνεται πως οι πτώσεις ξεκινούν από το 1988 κι έπειτα. Ακόμη και στις υποβαθμισμένες ζώνες οι πτώσεις τους θερινούς μήνες ήταν σταθερές από το 1972 (έναρξη περιόδου καταγραφής) μέχρι το 1987 και τους χειμερινούς μήνες πραγματοποιούνταν ικανοποιητική ανύψωση.
- Είναι ανάμεσα στις ελάχιστες χρονιές για τις οποίες υπάρχει πληθώρα καταγραφής των υδραυλικών υψών του υδροφορέα.

Πίνακας 7. 12. Θέσεις και στάθμες των πηγαδιών παρατήρησης

Πηγάδι	X	Y	Αρχικά Ύψη (μ.)
P6L	637874	4394211	52.82
LB310	649089	4371386	48.93
AD14	653522.3	4370390	40.8
SR63a	652594.2	4364801	34.68
AG17a	649002	4366046	59.82
PZ15	650170.5	4372364	40.62
AG14	644246	4376506	51.66
SR43	643202	4370724	64.4
SR32	637576.8	4375596	68.35
SR31	640758.1	4378887	58.33
PZ67	641486	4380913	54.2
402	650046.8	4381276	43.69
SR66	646465.5	4378039	39.8
PZ50	638888	4387371	53.12
P17L	631492	4383752	67.52
PZ7	642281.8	4391853	56.5
SR30	632522.3	4380364	72.95
AD11	636705.3	4382399	59.9
PZ68	645376.4	4367725	71.77
E3	654937	4361328	47.98
LB202	653280	4378456	34.25
PZ65	660104.5	4373872	27.78
PZ45	644182	4388225	41.08
PZ64	657371.6	4375602	32.45

Η χωρική παρεμβολή έγινε με τη χρήση της Simple Kriging και παρουσιάζεται στο χάρτη του Σχήματος 7.25.



Σχήμα 7. 25. Κατανομή των αρχικών υδραυλικών υψών του μοντέλου υπόγειας ροής

7.5.6 Ρύθμιση μοντέλου υπόγειας ροής

Η ρύθμιση του μοντέλου υπόγειας ροής πραγματοποιήθηκε για τη δεκαετία 1987-1997, μέσω της ντετερμινιστικής εφαρμογής του. Η παράμετρος για την οποία ρυθμίστηκε το μοντέλο ήταν η υδραυλική αγωγιμότητα. Τα παρατηρούμενα υδραυλική ύψη δόθηκαν από τα ίδια 24 πηγάδια παρατήρησης, που χρησιμοποιήθηκαν και για την κατάρτιση των αρχικών συνθηκών.

Η ρύθμιση αυτή επιτεύχθηκε μέσω της παράλληλης εφαρμογής της Γεωστατιστικής Βιβλιοθήκης GSLIB και του MODFLOW. Ο λόγος είναι πως εφόσον ήταν γνωστές οι δειγματοληπτικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, αυτό το οποίο έπρεπε να ρυθμιστεί, μέσω του αντίστροφου προβλήματος, ήταν το ημιβαριόγραμμα, το οποίο περιγράφει τη χωρική μεταβλητότητα της παραμέτρου στο πεδίο. Αυτό πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της υπορουτίνας PEST (Doherty, 2010) του GMS, στην οποία η αντικειμενική της συνάρτηση στόχο είχε την ελαχιστοποίηση της απόκλισης

των προσομοιωμένων υδραυλικών υψών με τα παρατηρούμενα. Η διαδικασία ρύθμισης ήταν επαναληπτική και ξεκινούσε από το GLSIB με την κατάρτιση ενός θεωρητικού ημιβαριογράμματος, τη χωρική παρεμβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας με την Απλή Kriging, την είσοδο των τιμών αυτών στο MODFLOW και την εφαρμογή της υπορουτίνας PEST. Η εφαρμογή της PEST πρότεινε νέες τιμές της παραμέτρου στις 15 δειγματοληπτικές θέσεις, ώστε να ικανοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση. Ανάλογα με τις προτεινόμενες από την PEST τιμές, δοκιμαζόνταν και ένα νέο θεωρητικό ημιβαριόγραμμα, ώστε να προκύψει το βέλτιστο. Το βέλτιστο θεωρητικό ημιβαριόγραμμα της εξίσωσης 7.9 ορίζει εκείνη τη χωρική μεταβλητότητα της παραμέτρου, για την οποία, το MODFLOW παράγει υδραυλικά ύψη με τη μικρότερη δυνατή απόκλιση από τα παρατηρούμενα (Πίνακας 7.13).

Πίνακας 7. 13. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες τιμές για την 01/1997

Πηγάδι	X	Y	Προσομοιωμένα 01/1997 (μ.)	Παρατηρούμενα 01/1997 (μ.)
P6L	637874	4394211	52.168	53.15
LB310	649089	4371386	22	23.48
AD14	653522.3	4370390	39.607	41.44
SR63a	652594.2	4364801	22.004	20.2
AG17a	649002	4366046	31.401	29.5
PZ15	650170.5	4372364	16.145	14.4
AG14	644246	4376506	24.94	26.58
SR43	643202	4370724	29.668	31.47
SR32	637576.8	4375596	31.524	31.7
SR31	640758.1	4378887	35.461	35.78
PZ67	641486	4380913	43.135	44.42
402	650046.8	4381276	39.132	38.56
SR66	646465.5	4378039	35.022	33.83
PZ50	638888	4387371	50.543	50.78
P17L	631492	4383752	53.208	54.43
PZ7	642281.8	4391853	55.449	54.22
SR30	632522.3	4380364	47.221	46.17
AD11	636705.3	4382399	43.179	42.18
PZ68	645376.4	4367725	63.673	65.1
E3	654937	4361328	33.948	33.67
LB202	653280	4378456	39.804	40
PZ65	660104.5	4373872	25.968	27
PZ45	644182	4388225	30.791	30.68
PZ64	657371.6	4375602	32.93	31.1

Για την αξιολόγηση της ρύθμισης χρησιμοποιήθηκαν τα εξής στατιστικά κριτήρια:

1. Το απόλυτο μέσο σφάλμα MAE, το οποίο είναι η απόλυτη τιμή του μέσου των αποκλίσεων των προσομοιωμένων τιμών από τις παρατηρούμενες:

$$MAE = \frac{\sum_{j=1}^n |(X_{p_j} - X_{o_j})|}{n} \quad (7.10)$$

όπου:

- X , το υδραυλικό ύψος
- j , ο αύξων αριθμός του κάθε πηγαδιού παρατήρησης
- N , ο συνολικός αριθμός των πηγαδιών παρατήρησης
- ο και p , ο συμβολισμός για τα παρατηρούμενα και προσομοιωμένα υδραυλικά ύψη αντίστοιχα

Για μια τέλεια ρύθμιση στην οποία $X_p = X_o$, τότε και $MAE=0$.

2. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n |(X_{p_j} - X_{o_j})|^2}{n}} \quad (7.11)$$

3. Η χρήση του διαγράμματος διασποράς, στο οποίο οι προσομοιωμένες τιμές αποτυπώνονται έναντι των παρατηρούμενων. Στο εν λόγω διάγραμμα, μία ευθεία γραμμή τάσης προσαρμόζεται στις τιμές:

$$X_p = \gamma X_o + \beta \quad (7.12)$$

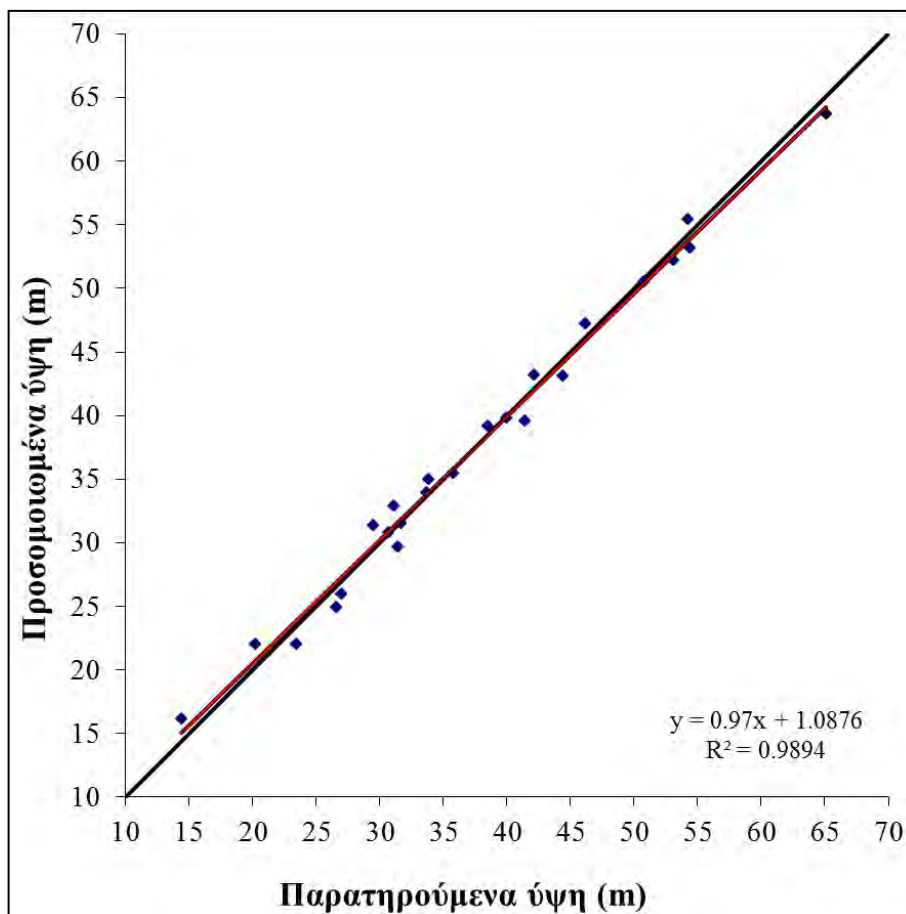
και η κλίση γ συγκρίνεται με την 1:1 γραμμή. Η τιμή της κλίσης γ είναι ένα μέτρο της υπερεκτίμησης ($\gamma > 1.0$) ή της υπο-εκτίμησης ($\gamma < 1.0$) του μοντέλου. Επιπλέον, υπολογίζεται και ο συντελεστής προσδιορισμού ($0 < R^2 < 1$) της γραμμής τάσης. Όσο πιο πολύ πλησιάζει τη μονάδα, τόσο πιο πολύ τα προσομοιωμένα υδραυλικά ύψη πλησιάζουν τα παρατηρούμενα.

Ο Πίνακας 7.14 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των στατιστικών κριτηρίων, ενώ στο Σχήμα 7.26 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς, με τη γραμμή τάσης (κόκκινη γραμμή) και την 1:1 γραμμή (μαύρη γραμμή)..

Πίνακας 7. 14. Στατιστικά κριτήρια ρύθμισης του μοντέλου

MAE	RMSE	γ	R^2
0.038	1.252	0.97	0.9894

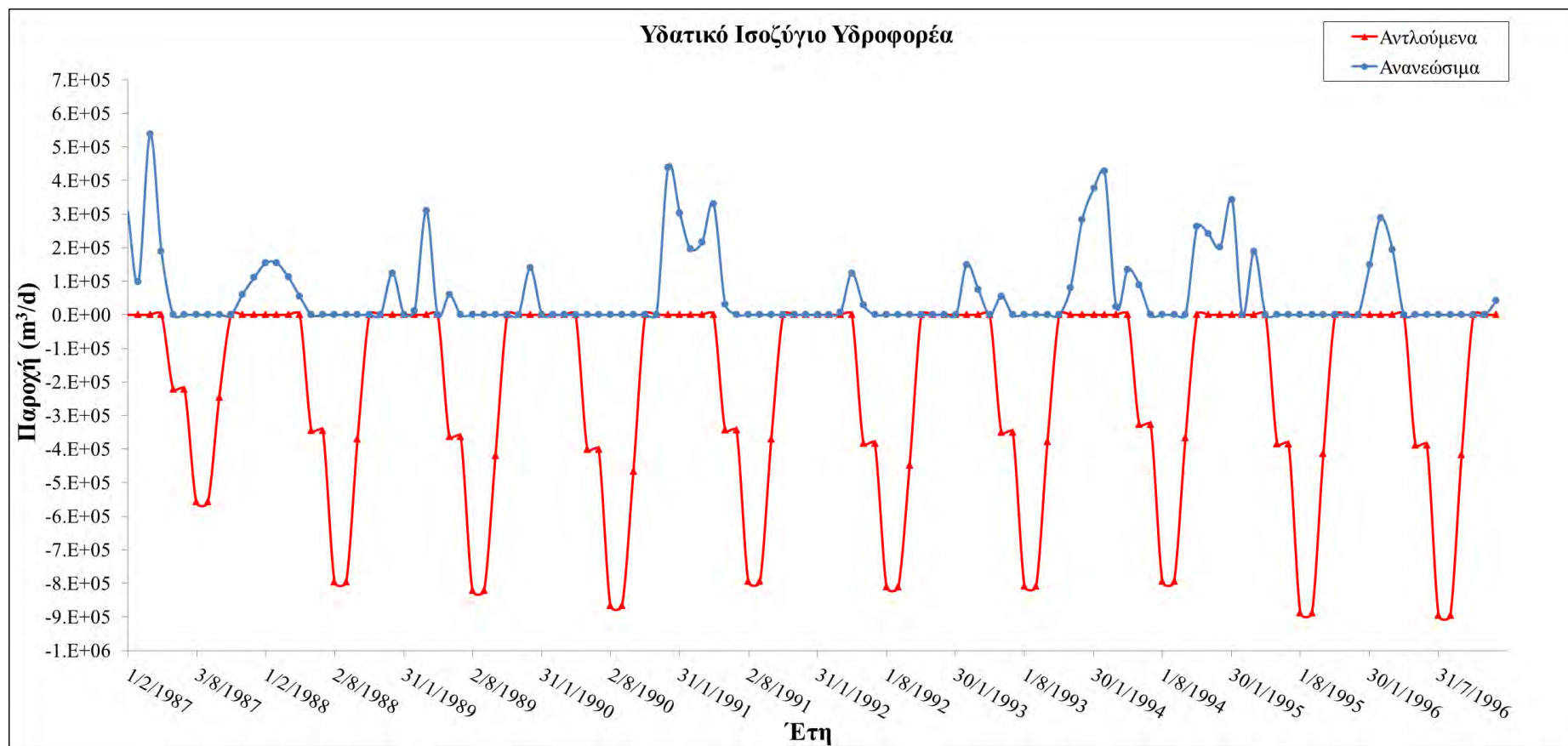
Τόσο από τα στατιστικά κριτήρια, όσο και από το διάγραμμα διασποράς η ρύθμιση του μοντέλου κρίνεται ικανοποιητική.



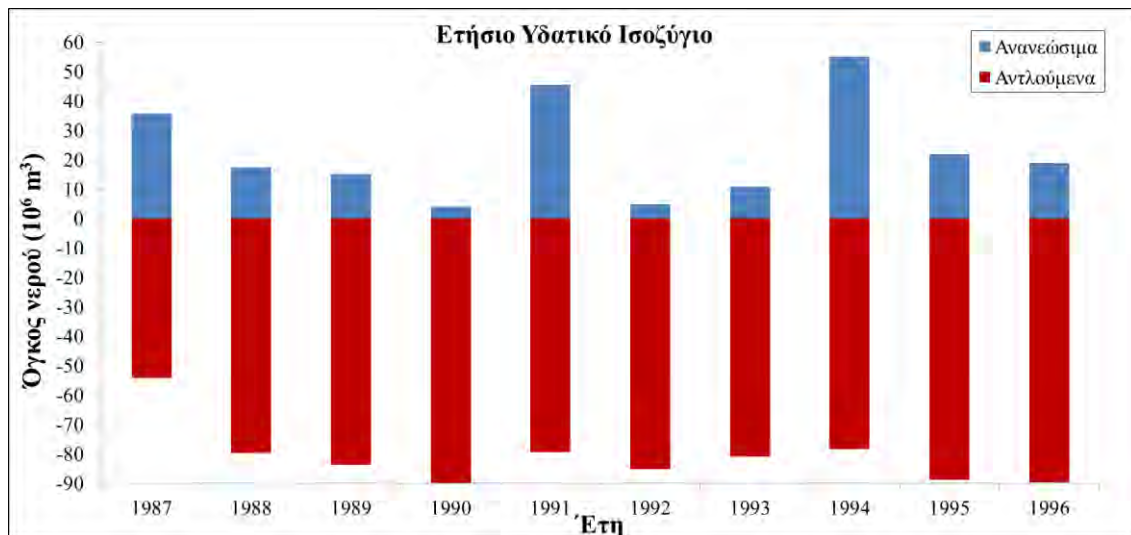
Σχήμα 7. 26. Διάγραμμα διασποράς προσομοιωμένων έναντι παρατηρούμενων υδραυλικών υψών, με τη γραμμή τάσης (κόκκινη) και την 1:1 γραμμή (μαύρη)

Εφόσον καταρτίστηκαν και ρυθμίστηκαν όλα τα μοντέλα, ξεκίνησε η εφαρμογή του συστήματος προσομοίωσης πρώτα για τη μη διαχειριστική περίοδο 1987-2012. Για αυτή την περίοδο και εφόσον δεν λειτουργεί ο ταμιευτήρας, τα μοντέλα που συμμετέχουν είναι το UTHBAL, το GSLIB και το MODFLOW. Τα αποτελέσματα εξάγονται σε μηνιαίο βήμα, αλλά δύο ήταν οι χρονολογίες «ορόσημο», η πρώτη η 01/1997, όπου γίνεται η ρύθμιση του μοντέλου υπόγειας ροής και η δεύτερη η 01/2012, όπου ξεκινά η διαχειριστική περίοδος. Τα αποτελέσματα, τα οποία αξιολογήθηκαν ήταν τα υδατικά ισοζύγια και τα υδραυλικά ύψη, μιας και αυτά θα κρίνουν τη στρατηγική διαχείρισης που θα καταστρωθεί.

Στα Σχήματα 7.27 και 7.28 παρουσιάζονται γραφήματα που έχουν να κάνουν με το υδατικό ισοζύγιο του υπόγειου υδροφορέα για την περίοδο 1987-1997. Στο πρώτο σχήμα με την κόκκινη γραμμή παρουσιάζονται οι μηνιαίες αντλούμενες παροχές των πηγαδιών, ενώ με τη μπλε γραμμή οι μηνιαίες ανανεώσιμες παροχές, όπως προέκυψαν από το μοντέλο υπόγειας ροής. Αυτές προέρχονται από την κατείδυση και τις πλευρικές εισροές. Το γράφημα του Σχήματος 7.28 προέκυψε από επεξεργασία των αποτελεσμάτων του 7.27, ανάγοντας τις μηνιαίες παροχές σε ετήσιους όγκους, δίνοντας έτσι μια πιο γενική εικόνα του ετήσιου υδατικού ισοζυγίου του υδροφορέα. Γίνεται αντιληπτό, πως ο υδροφορέας της Κάρλας βρίσκεται σε καθεστώς υπερεκμετάλλευσης των αποθεμάτων του και αυτό επιβεβαιώνεται από τους χάρτες των υδραυλικών υψών.



Σχήμα 7. 27. Μηνιαίες παροχές των αντλούμενων και ανανεώσιμων υδάτων του υπόγειου υδροφορέα για την περίοδο 1987-1997

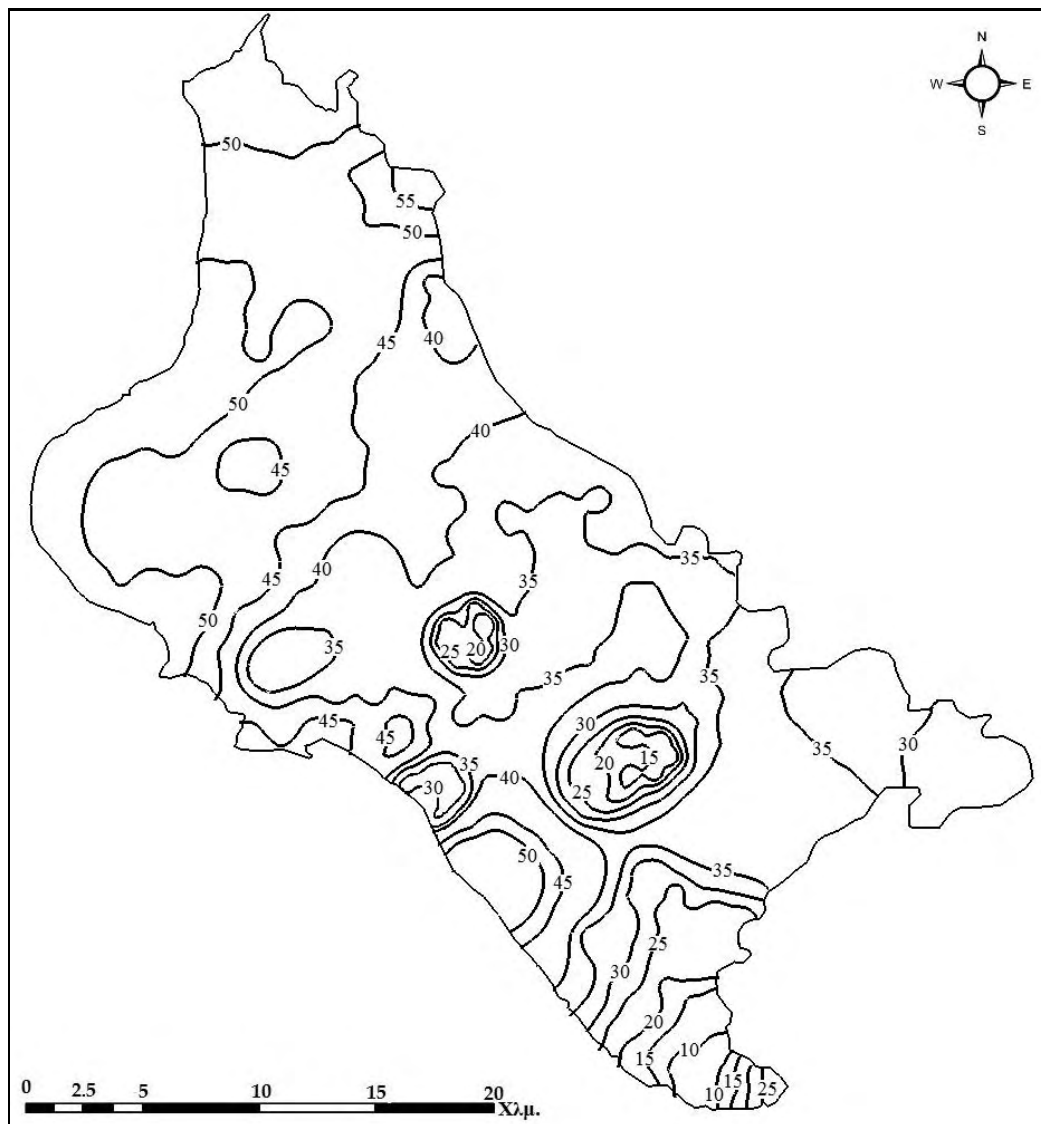


Σχήμα 7. 28. Ετήσιο υδατικό ισοζύγιο του υπόγειου υδροφορέα για την περίοδο 1987-1997

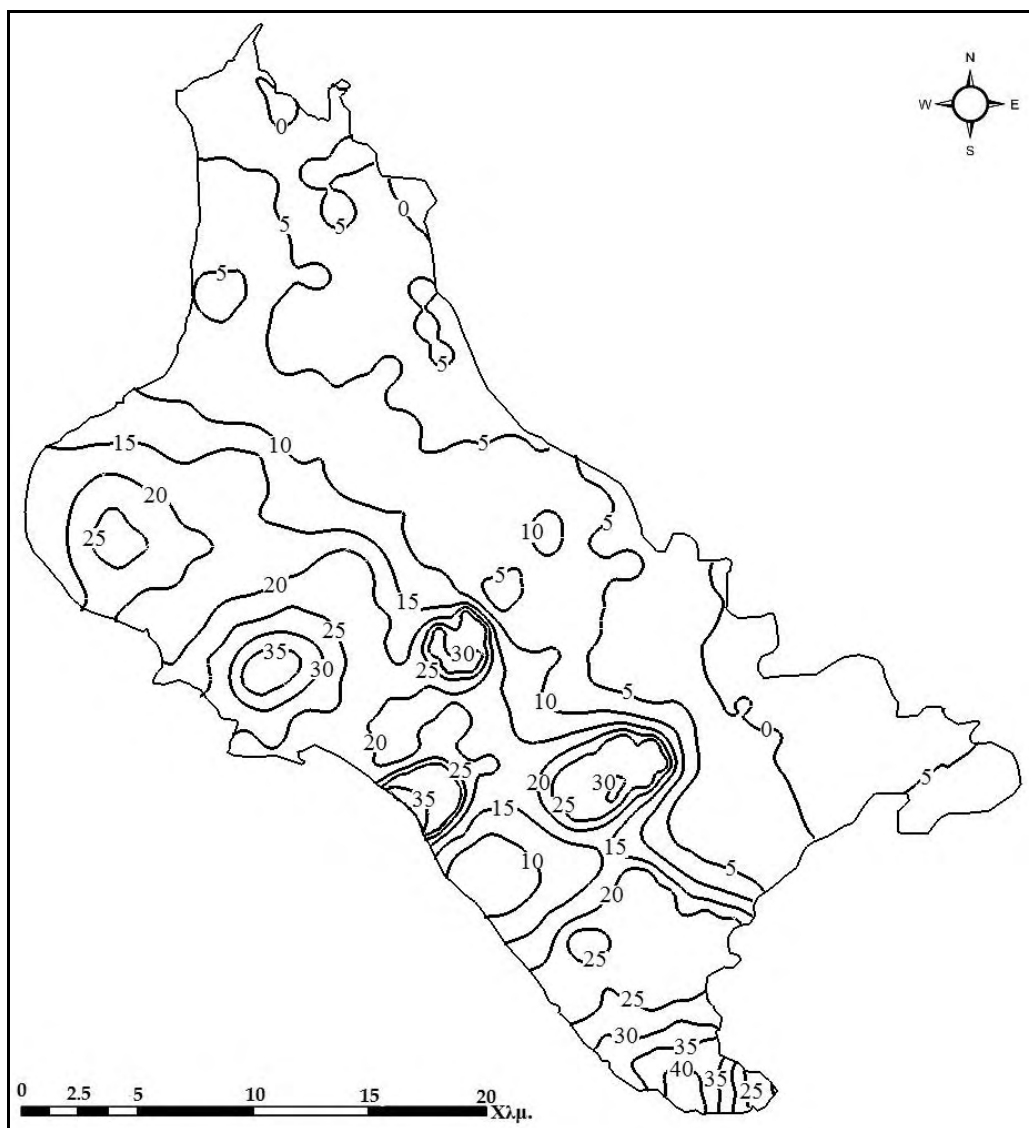
Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, για χρονιές με μικρή κατείδυση, άρα και έλλειψη βροχοπτώσεων σε παρελθόντα χρόνο, αυξάνονται οι αντλήσεις του υπόγειου ύδατος, γεγονός που οδηγεί σε χρονιές στις οποίες το έλλειμμα, δηλαδή η άντληση των μη ανανεώσιμων υδατικών αποθεμάτων φτάνει και τα 85 hm³/y, όπως συνέβη για το 1990.

Για την αντιπροσωπευτικότερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.29 ο χάρτης των μέσων υδραυλικών υψών από τις 100 πραγματώσεις του υδροφορέα για το 1997. Η διατάραξη των ισοπιεζομετρικών γραμμών των υδραυλικών υψών είναι έντονη και οφείλεται στις αντλήσεις των πηγαδιών. Στο χάρτη του Σχήματος 7.30 παρουσιάζονται οι διαφορές των υδραυλικών υψών ανάμεσα στα αρχικά ύψη του 1987 (Σχήμα 7.25) και στα μέσα ύψη του 1997 (Σχήμα 7.29). Η ταπείνωση της στάθμης του υδροφορέα είναι έντονη στα δυτικά και νότια της περιοχής μελέτης, όπως ακριβώς είχε παρουσιασθεί και στο υποκεφάλαιο 5.5.3 και αφορά τη ζώνη τρία του Σχήματος 5.10. Η πτώση αυτή φτάνει μέσα στη δεκαετία '87-'97 ακόμη και τα 40 μέτρα.

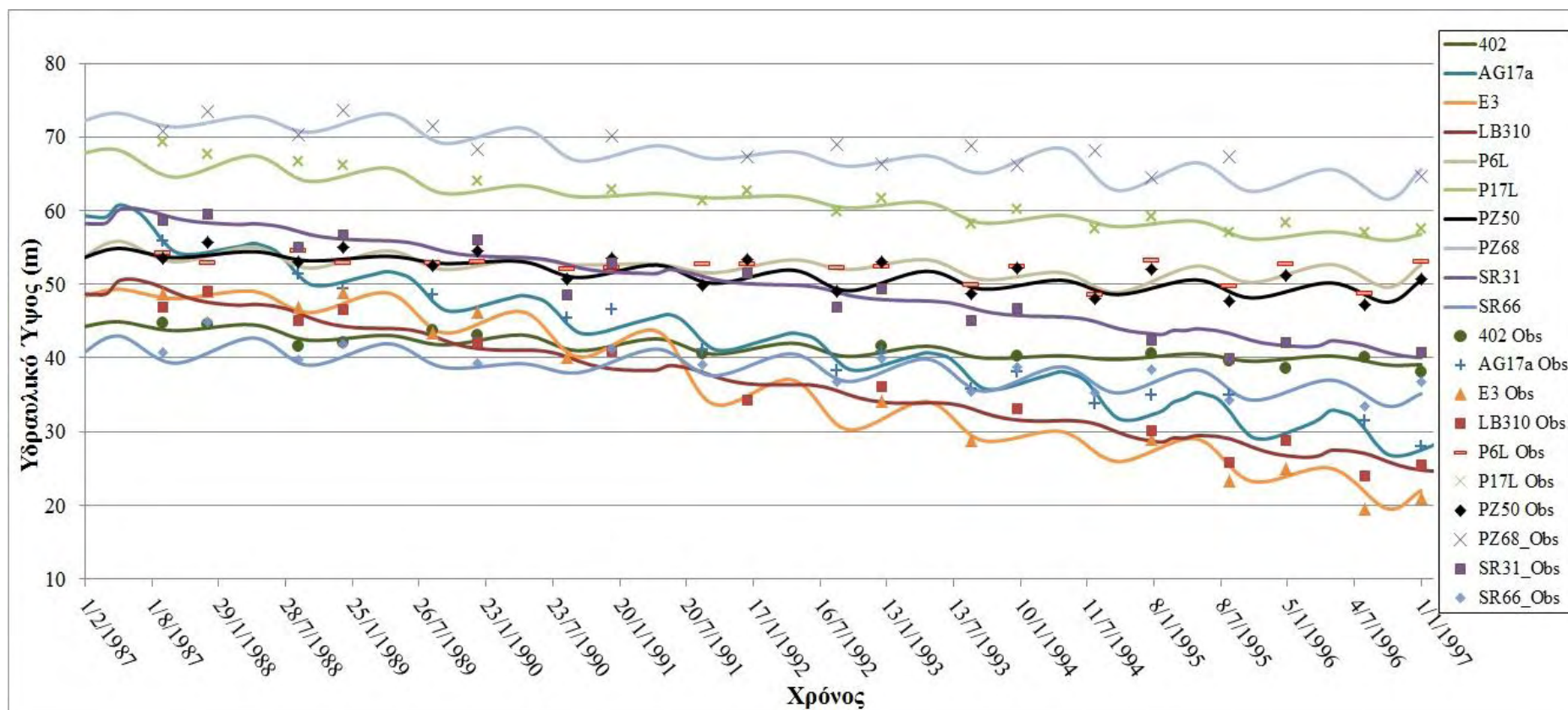
Στο Σχήμα 7.31 παρουσιάζεται γράφημα των μέσων προσομοιωμένων υδραυλικών υψών (συνεχής γραμμές) και των παρατηρούμενων (σημεία) στα κελιά δέκα ενδεικτικών πηγαδιών παρατήρησης για τη δεκαετία '87-'97. Τα πηγάδια παρατήρησης καλύπτουν το πεδίο μελέτης και οι θέσεις τους φαίνονται στο σχήμα 7.32. Πέρα από την ικανοποιητική σύγκλιση ανάμεσα στις προσομοιωμένες και παρατηρούμενες τιμές, εξάγονται κι εδώ τα ίδια συμπεράσματα για την έντονη πτώση του υδροφόρου ορίζοντα στη δυτική και νότια περιοχή του υδροφορέα.



Σχήμα 7. 29. Χάρτης των μέσων τιμών των υδραυλικών υψών από τις 100 πραγματώσεις του υδροφορέα για το 1997

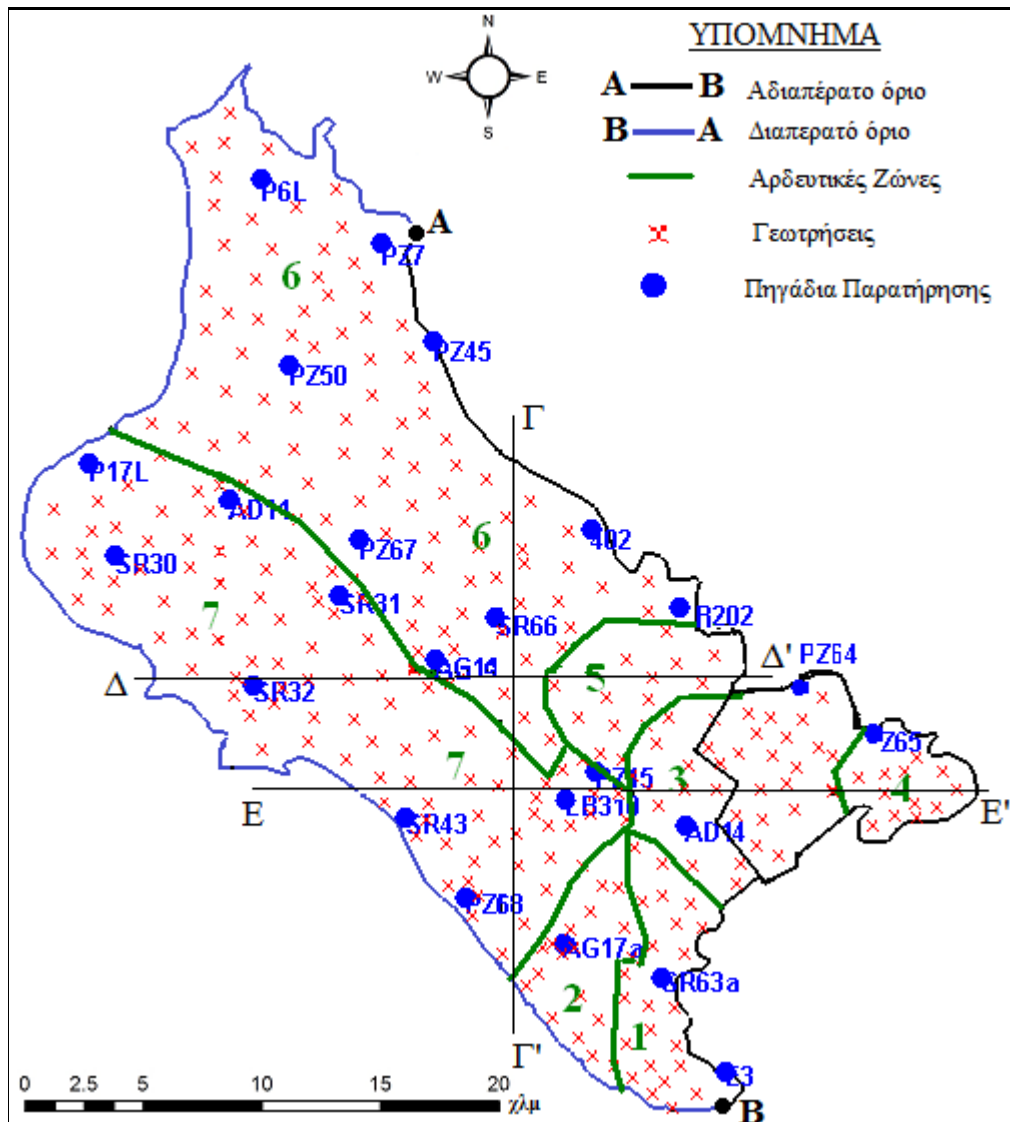


Σχήμα 7. 30. Διαφορά υδραυλικών υψών των ετών 1987 και 1997



Σχήμα 7. 31. Προσομοιωμένα μέσα υδραυλικά ύψη και παρατηρούμενα στα κελιά δέκα ενδεικτικών πηγαδιών παρατήρησης για τη δεκαετία '87-'97

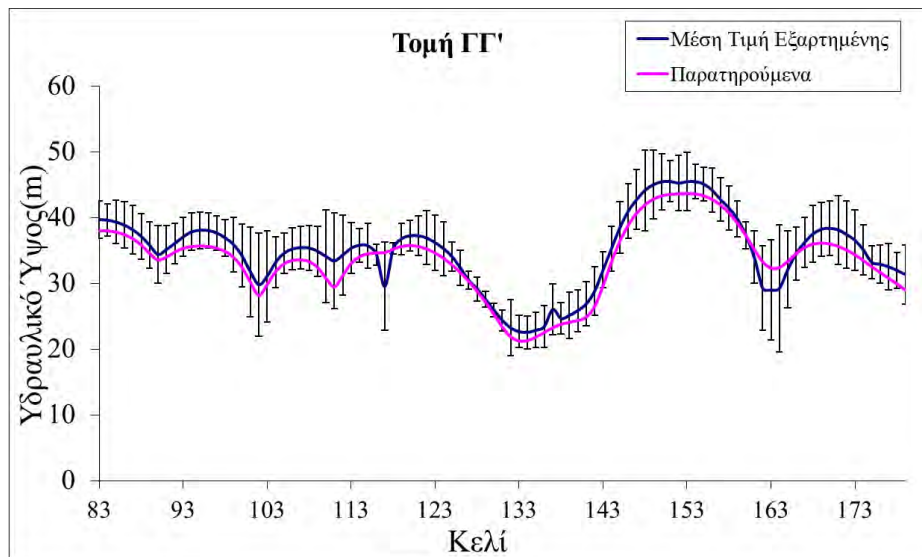
Ως προς την αξιολόγηση των στοχαστικών αποτελεσμάτων παρουσιάζονται τα υδραυλικά ύψη σε συγκεκριμένες τομές του πεδίου μελέτης (Σχήμα 7.33) και χρησιμοποιείται ως μέτρο σύγκρισης της παραγόμενης αβεβαιότητας η τυπική απόκλιση. Επιπλέον αξιολογείται και η αξιοπιστία της ρύθμισης του μοντέλου, με τη σύγκριση των μέσων υδραυλικών υψών με τα παρατηρούμενα.



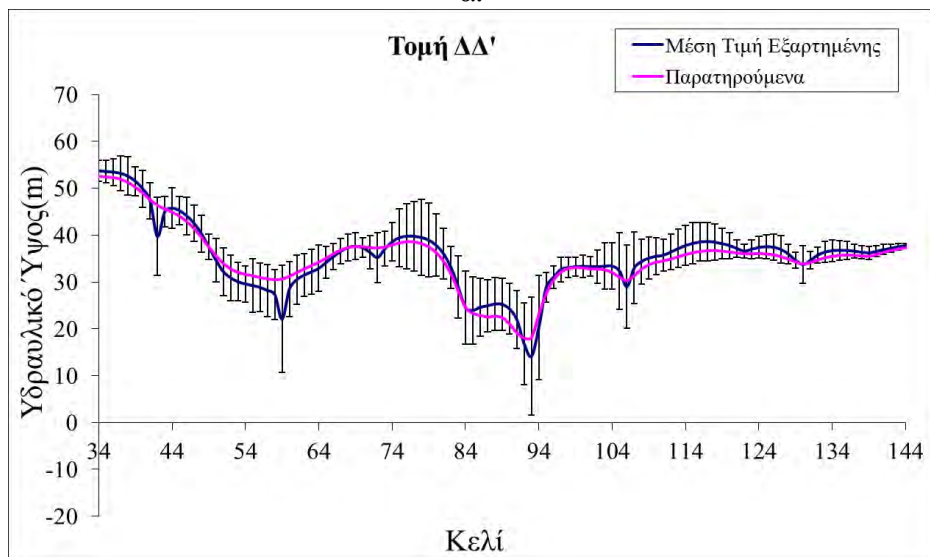
Σχήμα 7. 32. Τομές του πεδίου μελέτης για τα αποτελέσματα του 1997

Η επιλογή των τριών τομών έγινε με γνώμονα το γεγονός ότι διαπερνούν περιοχές ηρεμίας – στις οποίες δεν υφίστανται ανθρωπογενούς πίεση – και περιοχές στις οποίες λειτουργούν γεωτρήσεις άντλησης – καθώς επίσης ότι διαπερνούν το δυτικό και νότιο τμήμα του πεδίου μελέτης, το οποίο όπως έχει αποδειχθεί παραπάνω παρατηρούνται οι μεγαλύτερες πτώσεις των υδραυλικών υψών.

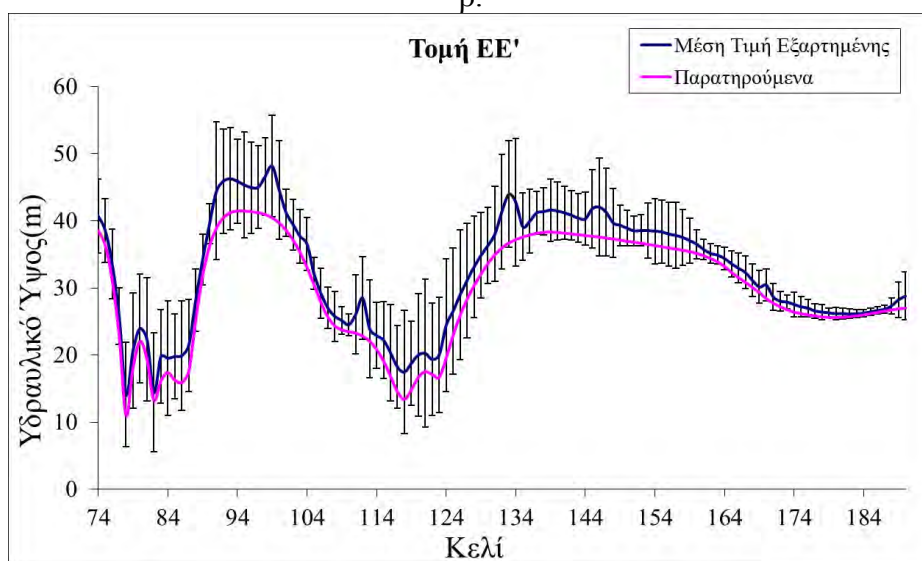
Στα γραφήματα του Σχήματος 7.33 οι μέσες τιμές των υδραυλικών υψών απεικονίζονται με τη συνεχή μαύρη γραμμή και οι παρατηρούμενες με τη ροζ. Οι κάθετες στις γραμμές είναι το εύρος της $\pm 2\sigma$. Οι έντονες πτώσεις οφείλονται στην παρουσία των γεωτρήσεων.



α.



β.

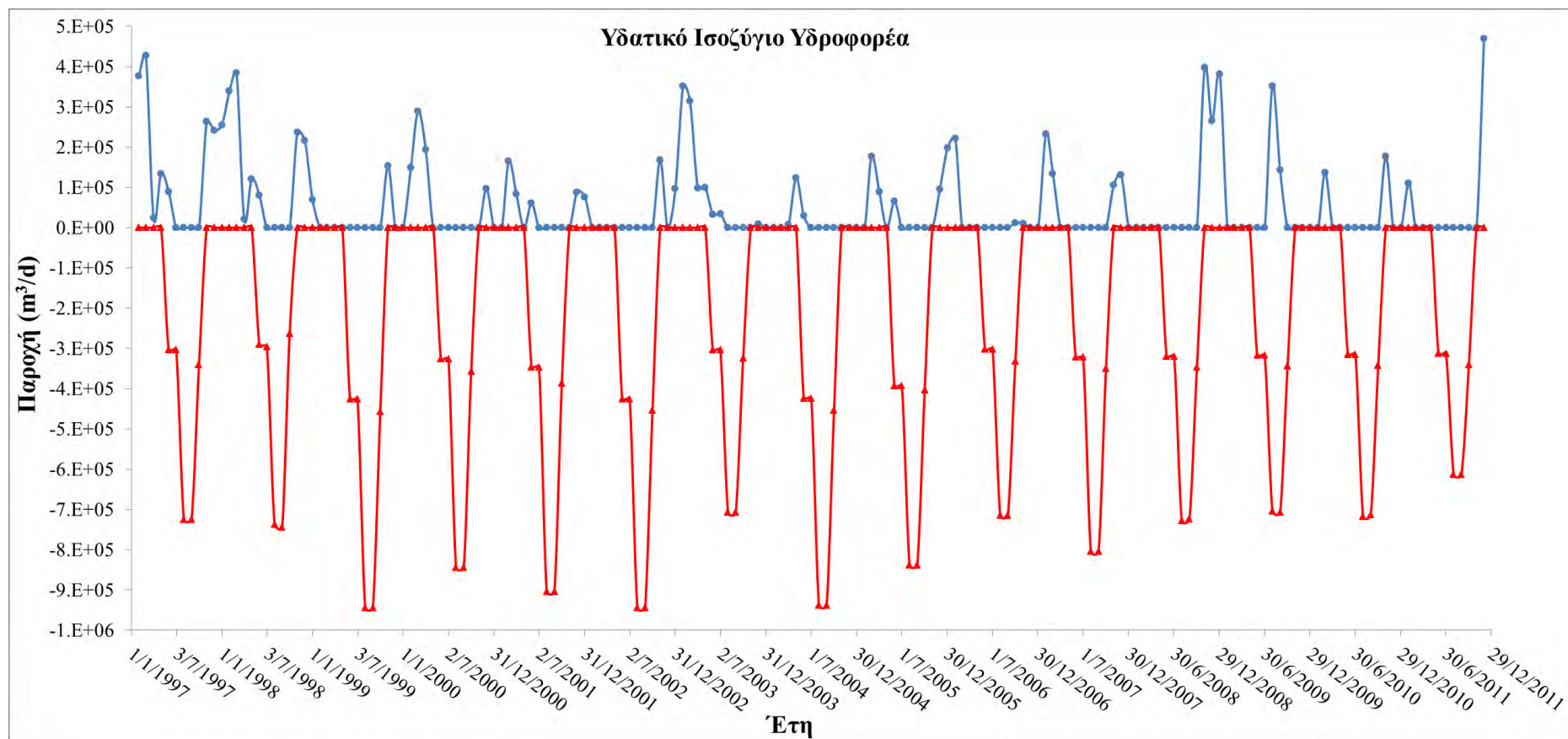


γ.

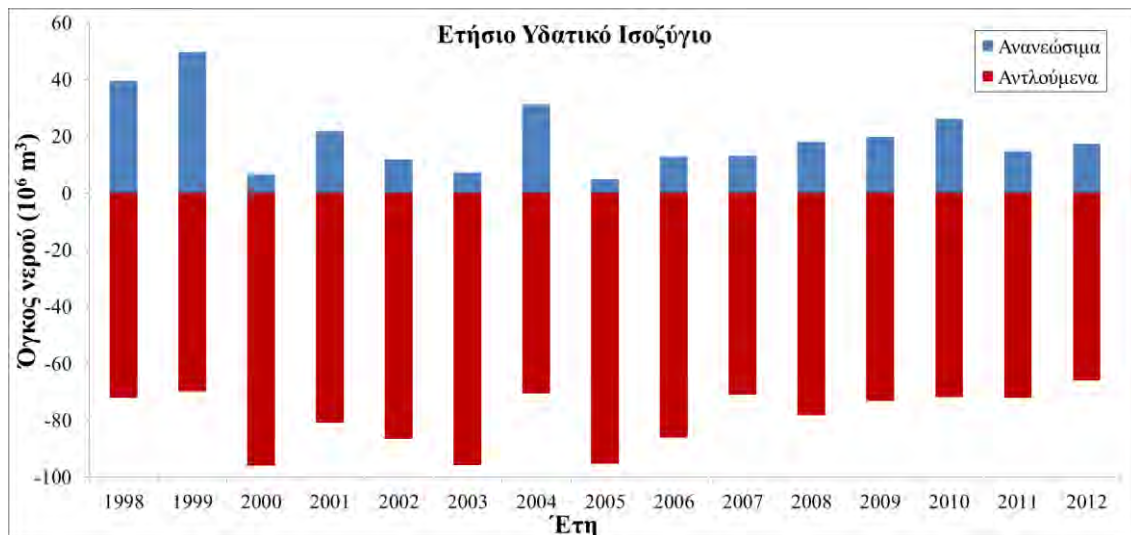
Σχήμα 7. 33. Παρατηρούμενα και μέσα υδραυλικά ύψη των 100 προσομοιώσεων για τις τομές:
α. ΓΓ', β. ΔΔ' και γ. ΕΕ'

Και στις τρεις τομές, η παραγόμενη αβεβαιότητα, η οποία οφείλεται στην υδραυλική αγωγιμότητα έχει μικρές τιμές στις περιοχές ηρεμίας, ενώ αυξάνεται στις περιοχές ανθρωπογενούς πίεσης. Αυτό οφείλεται στην παρουσία πολλών γεωτρήσεων και στην αδυναμία του μοντέλου να επιλύσει ικανοποιητικά τη διαφορική θεμελιώδη εξίσωση 6.34, παρά την πύκνωση των κελιών. Το γεγονός όμως αυτό εμφανίζεται μόνο στα κελιά των γεωτρήσεων και δεν επηρεάζει τη σταθερότητα του μοντέλου, μιας και ο συνολικός αριθμός είναι 12500 κελιά. Το ίδιο ισχύει και για τη σύγκριση με τα παρατηρούμενα ύψη, αλλά σε μικρότερο βαθμό, μιας και υπάρχουν περιοχές ανθρωπογενούς πίεσης, για τις οποίες η σύγκλιση προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών είναι ικανοποιητική, όπως συμβαίνει στα κελιά 83-103, 123-153 της τομής ΓΓ' και στα κελιά 64-94 της τομής ΔΔ'.

Το αποτέλεσμα της επίδρασης της αβεβαιότητας στην εκτίμηση των υδραυλικών υψών, που πυροδότησε τις σκέψεις για την αναγκαιότητα της αξίας της πληροφορίας, οφείλεται στην απόκλιση που παρατηρείται ανάμεσα στα υδραυλικά ύψη των πραγματώσεων. Όποια και να είναι η τιμή της τυπικής απόκλισης, αυτό σημαίνει πως υπάρχει ένα εύρος υδραυλικών τιμών που αποκλίνουν από τη μέση τιμή. Υπάρχουν δηλαδή πραγματώσεις του υπόγειου υδροφορέα, ανάμεσα στις 100, για τις οποίες οι τιμές των υδραυλικών υψών απέχουν μέχρι και μέτρα από τη μέση τιμή, γεγονός το οποίο γεννά αβεβαιότητα στο διαχειριστή, όταν αυτός θέλει να εφαρμόσει μια στρατηγική διαχείρισης. Το πιο σίγουρο που μπορεί να κάνει είναι να χαράξει μια στρατηγική θεωρώντας ως πιο αντιπροσωπευτική απεικόνιση τη μέση τιμή όπως φαίνεται στο 7.29. Όταν όμως σε αυτή τη χάραξη στρατηγικής εμπλέκονται και οικονομικοί όροι, τότε η απόφαση αυτή δεν είναι τόσο εύκολη. Αυτό ισχύει στην εν λόγω έρευνα. Όταν υπάρχει ο σχεδιασμός της άντλησης «επιτρεπόμενου» υπόγειου ύδατος προς πώληση από το διαχειριστή για την κάλυψη κυρίως αρδευτικών αναγκών, τότε η μέση λύση επιφέρει και περιβαλλοντική και οικονομική ζημιά. Περιβαλλοντική, διότι μπορεί η μέση τιμή να είναι η αντιπροσωπευτικότερη, αλλά δεν σημαίνει πως είναι και η σωστή. Έτσι, μπορεί στο πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο θα βρίσκει το «επιτρεπόμενο» αντλούμενο όγκο, ώστε να μην αντλούνται τα μη ανανεώσιμα αποθέματα, η πραγματική τιμή των υδραυλικών υψών να είναι μικρότερη από τη μέση, με αποτέλεσμα αυτό να δίνει μεγαλύτερο όγκο νερού προς άντληση, αλλά μέσα σε αυτόν να εμπεριέχονται και μόνιμα αποθέματα. Οικονομική, γιατί αν η πραγματική τιμή του υδραυλικού ύψους είναι μεγαλύτερη από τη μέση τιμή, τότε το πρόβλημα της βελτιστοποίησης θα δώσει μικρότερο «επιτρεπόμενο» αντλούμενο όγκο νερού προς πώληση και ο διαχειριστής θα έχει λιγότερα έσοδα. Κρίνοντας τα αποτελέσματα καθαρά από την άποψη της προσομοίωσης μπορεί κανείς να πει πως αποκλίσεις των ενός ή των δύο μέτρων μπορούν να γίνουν ανεκτές. Από την άποψη όμως της διαχείρισης και δη της οικονομικής έστω και το ένα μέτρο απόκλιση ισοδυναμεί με 500 hm³ ύδατος για όλη την περιοχή μελέτης, γεγονός που καθιστά την οικονομική αβεβαιότητα αρκετά σημαντική και τη στοχαστική προσομοίωση ως τη μόνη λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος της αβεβαιότητας. Τα επόμενα αποτελέσματα αναφέρονται στην 01/2012.



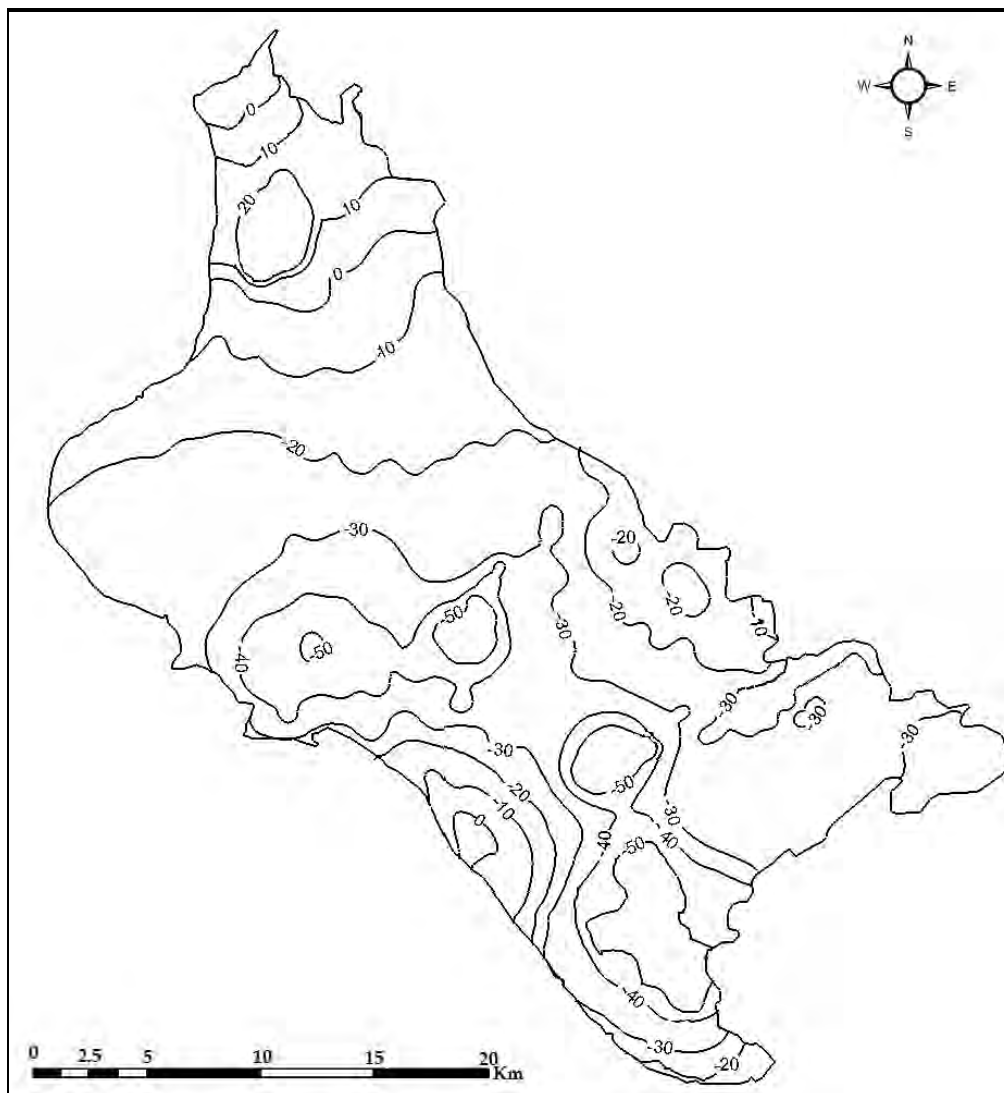
Σχήμα 7. 34. Μηνιαίες παροχές των αντλούμενων και ανανεώσιμων υδάτων του υπόγειου υδροφορέα για την περίοδο 1987-1997



Σχήμα 7. 35. Ετήσιο υδατικό ισοζύγιο του υπόγειου υδροφορέα για την περίοδο 1987-1997

Στα Σχήματα 7.34 και 7.35 παρουσιάζονται γραφήματα που έχουν να κάνουν με το υδατικό ισοζύγιο του υπόγειου υδροφορέα για την περίοδο 1998-2012. Στο πρώτο σχήμα με την κόκκινη γραμμή παρουσιάζονται οι μηνιαίες αντλούμενες παροχές των πηγαδιών, ενώ με τη μπλε γραμμή οι μηνιαίες ανανεώσιμες παροχές, όπως προέκυψαν από το μοντέλο υπόγειας ροής. Το γράφημα του Σχήματος 7.35 προέκυψε από επεξεργασία των αποτελεσμάτων του 7.34, ανάγοντας τις μηνιαίες παροχές σε ετήσιους όγκους, δίνοντας έτσι μια πιο γενική εικόνα του ετήσιου υδατικού ισοζυγίου του υδροφορέα. Ο υπόγειος υδροφορέας συνεχίζει να βρίσκεται σε καθεστώς υπερεκμετάλλευσης των υδατικών αποθεμάτων, η οποία φτάνει κάποιες χρονιές μέχρι και τα 90 hm³ ετησίως. Η συνεισφορά της κατεϊσδυσης και των πλευρικών εισροών, μπορεί να μειώθηκε μέσα σε αυτό το διάστημα, αλλά αυτό που πηγάζει σαν συμπέρασμα από το γράφημα του Σχήματος 7.34 είναι πως έχουν μειωθεί οι μήνες εμπλουτισμού του υδροφορέα κατά τη διάρκεια του έτους με ανανεώσιμα ύδατα. Αυτό το γεγονός οφείλεται καθαρά στην αλλαγή της διάρκειας των βροχοπτώσεων μέσα στο έτος. Τα τελευταία χρόνια παρατηρούνται έντονες βροχοπτώσεις, αλλά μικρής διάρκειας. Αυτό όμως το φαινόμενο αποτελεί απειλή για τη βιωσιμότητα των υπόγειων υδροφορέων, διότι υπό αυτές τις συνθήκες απορρέει ακόμη περισσότερο επιφανειακό νερό, με αποτέλεσμα η ποσότητα που εμπλουτίζει τα υπόγεια υδατικά συστήματα να μειώνεται.

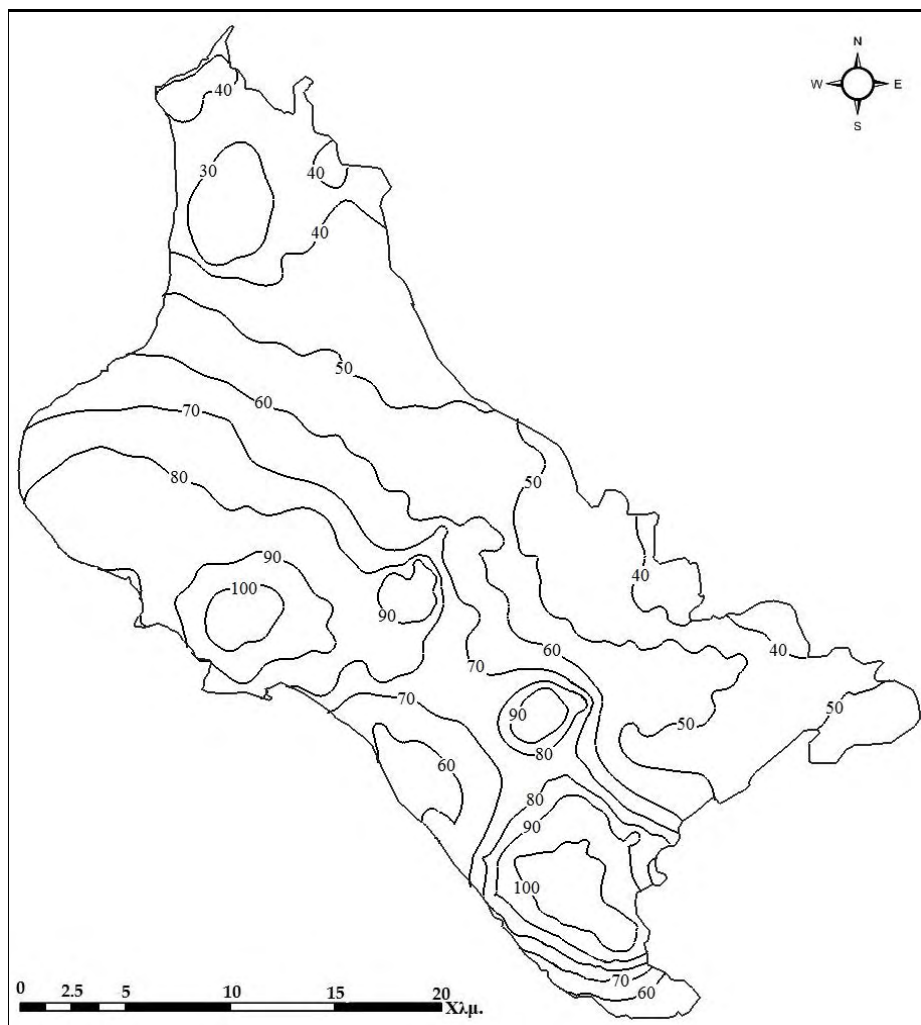
Για την αντιπροσωπευτικότερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.36 ο χάρτης των μέσων υδραυλικών υψών από τις 100 πραγματώσεις του υδροφορέα για το 2012. Στο χάρτη του Σχήματος 7.37.α παρουσιάζονται οι διαφορές των υδραυλικών υψών ανάμεσα στα αρχικά ύψη του 1987 (Σχήμα 7.25) και στα μέσα ύψη του 2012 (Σχήμα 7.36), ενώ στο Σχήμα 7.37.β παρουσιάζονται οι διαφορές των υδραυλικών υψών ανάμεσα στα μέσα ύψη του 1997 (Σχήμα 7.29) και του 2012 (Σχήμα 7.36).



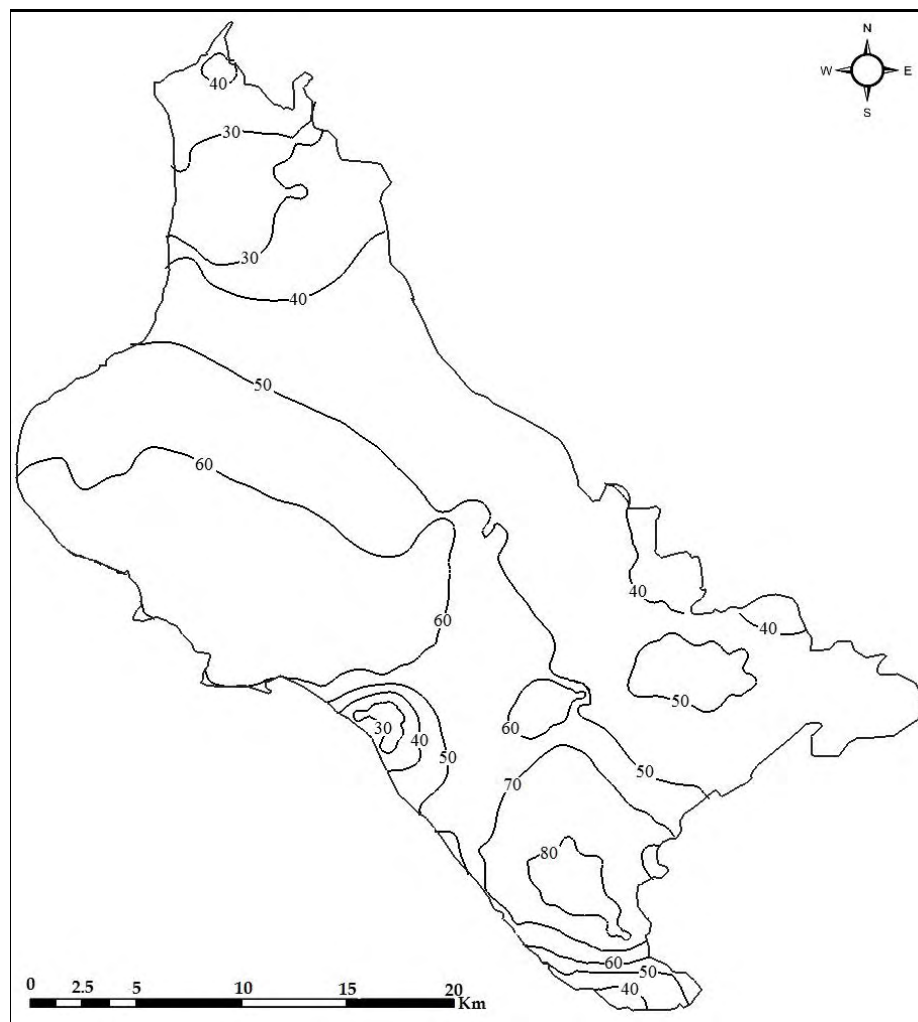
Σχήμα 7. 36. Χάρτης των μέσων τιμών των υδραυλικών υψών από τις 100 πραγματώσεις του υδροφορέα για το 2012

Η διατάραξη των ισοπιεζομετρικών γραμμών των υδραυλικών υψών συνεχίζει να είναι έντονη και οφείλεται στις αντλήσεις των πηγαδιών. Δυστυχώς για το 2012 δεν υπήρχαν παρατηρηρούμενες στάθμες, ώστε να γίνει ακόμη μία σύγκριση των μέσων προσομοιωμένων τιμών με αυτές.

Η ταπείνωση της στάθμης του υδροφορέα συνεχίζει να είναι έντονη στα δυτικά και νότια της περιοχής μελέτης. Η πτώση αυτή φτάνει για την εικοσιπενταετία 1987-2012 ακόμη και τα 100 μέτρα. Εξάγονται κι εδώ τα ίδια συμπεράσματα για την έντονη πτώση στη δυτική και νότια περιοχή του υδροφορέα. Δεν παρατηρείται καμία αντιστροφή της υποβάθμισης της στάθμης, αφού η κατάσταση με τις εκατοντάδες αρδευτικές γεωτρήσεις παραμένει ως έχει. Η κατάσταση αυτή αναμένεται να αντιστραφεί μόνο με τη λειτουργία του ταμιευτήρα της Κάρλας.



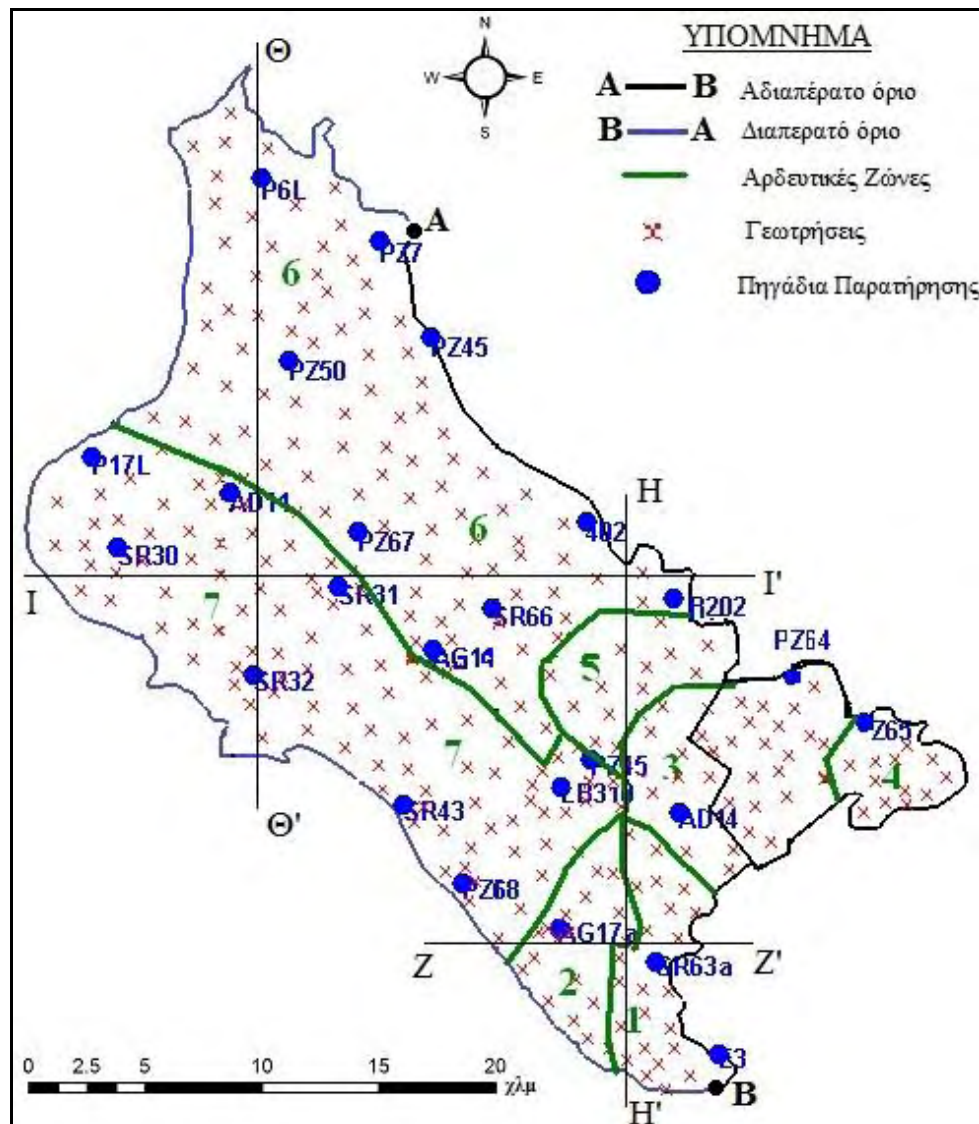
α.



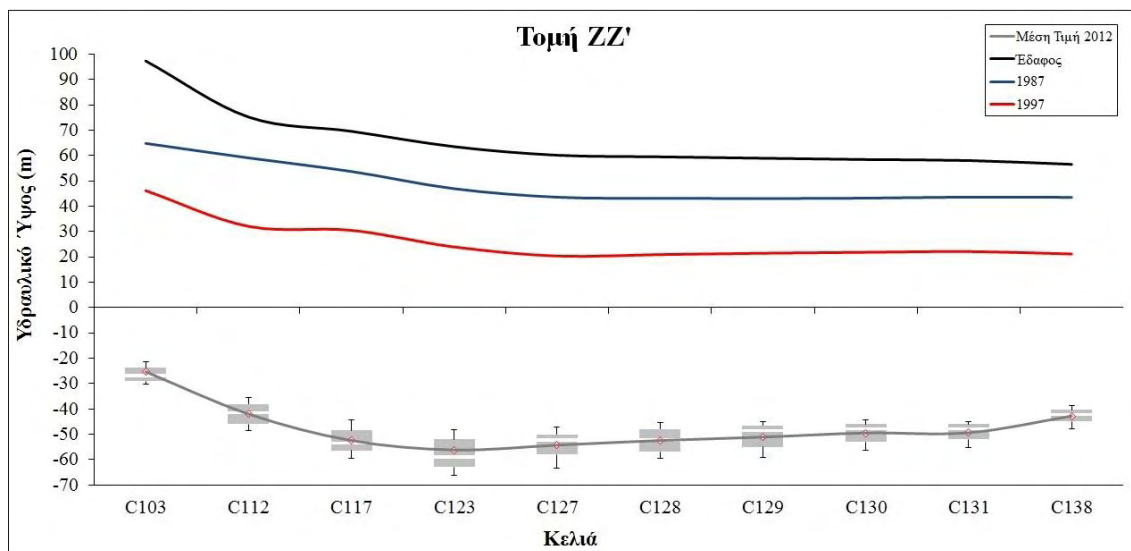
β.

Σχήμα 7. 37. Διαφορά υδραυλικών υψών: α. του 1987 με του 2012 και β. του 1997 με του 2012

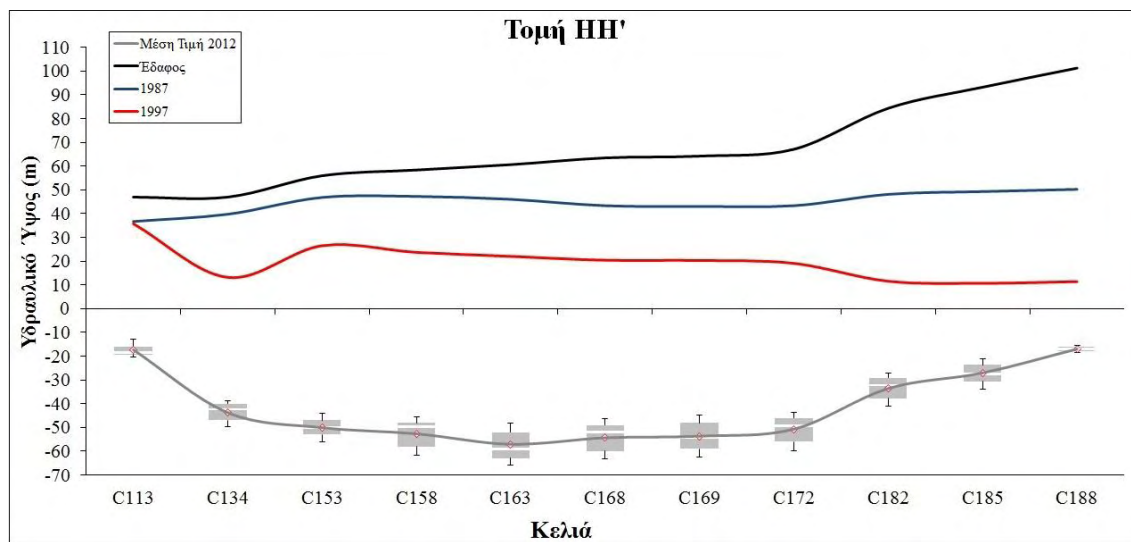
Για την εκτίμηση της αβεβαιότητας πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση των παραγόμενων υδραυλικών υψών την 01/2012. Τα υδραυλικά ύψη παρουσιάζονται σε συγκεκριμένες τομές του πεδίου μελέτης (Σχήμα 7.38) με τη μορφή θηκογραμμάτων. Οι τομές αυτές είναι διαφορετικές από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για το 1997, για λόγους αντιπροσωπευτικότητας και άλλων τμημάτων του πεδίου μελέτης. Παρόλα αυτά, παρουσιάζονται οι στάθμες του υπόγειου υδροφορέα και για το 1987 και για το 1997, για καθαρά συγκριτικούς λόγους. Όμως, εξαιτίας του χώρου που καταλαμβάνει ένα θηκόγραμμα, δεν ήταν δυνατό να συμμετέχουν όλα τα κελιά της κάθε τομής. Επιλέχθηκαν κελιά ηρεμίας και κελιά ανθρωπογενούς πίεσης.



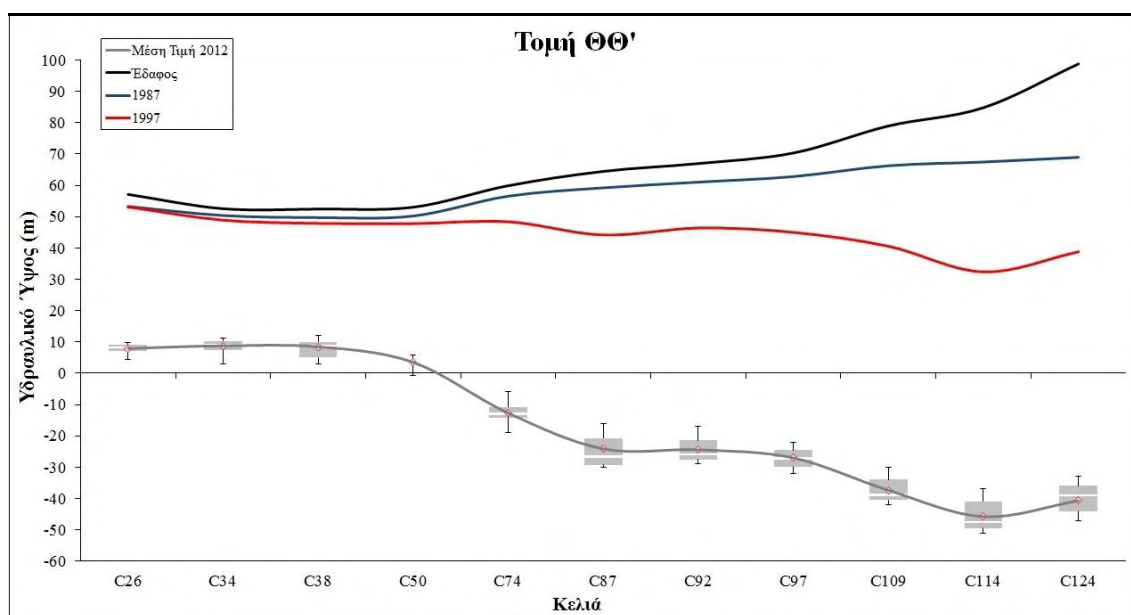
Σχήμα 7. 38. Τομές του πεδίου μελέτης για τα αποτελέσματα του 2012



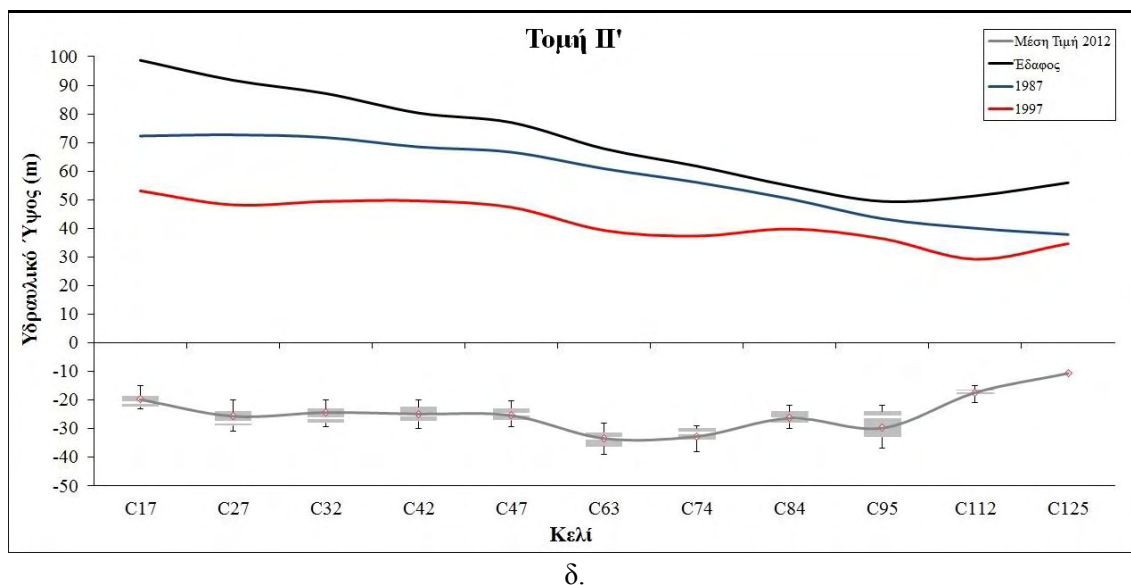
α.



β.



γ.



Σχήμα 7. 39. Θηκογράμματα των 100 υδραυλικών υψών της 01/2012 συν υψόμετρο εδάφους, υδραυλικό ύψος αρχικών συνθηκών (01/1987), μέσο υδραυλικό ύψος της 01/1997, σε συγκεκριμένα κελιά των τομών: α. ΖΖ', β. ΗΗ', γ. ΘΘ' και δ. ΙΙ'

Το πρώτο συμπέρασμα που εξάγεται από τις τομές του Σχήματος 7.39 είναι η σημαντική πτώση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα, το οποίο είχε παρατηρηθεί και στους χάρτες του Σχήματος 7.37. Όσον αφορά τώρα την εκτίμηση της αβεβαιότητας, αυτή επιτυγχάνεται με τη σύγκριση του εύρους τόσο του 1^{ου} και 3^{ου} τεταρτημορίου, όσο και των φραγμάτων των θηκογραμμάτων. Στα κελιά με έντονη υδραυλική πτώση (C127 της τομής ΖΖ'; C158-C172 της τομής ΗΗ'; C87, C109, C114 της τομής ΘΘ'; C95 της τομής ΙΙ') λόγω της παρουσίας γεωτρήσεων, τα εύρη των παραπάνω στατιστικών χαρακτηριστικών είναι μεγαλύτερα και άρα η αβεβαιότητα είναι μεγαλύτερη από ότι σε αυτά χωρίς την παρουσία γεωτρήσεων (C103, C131, C138 της τομής ΖΖ'; C113, C134, C153, C188 της τομής ΗΗ'; C26, C34, C50 της τομής ΘΘ'; C17-C47 και C112 της τομής ΙΙ'). Εδώ όμως, λόγω της έντονης ολικής ταπείνωσης της στάθμης η παραπάνω διαφορά δεν είναι τόσο έντονη όσο αυτής της 01/1997.

Η αβεβαιότητα, προερχόμενη τόσο από τη χωρική μεταβλητότητα, όσο και από την έλλειψη επαρκών δειγματοληπτικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας, επηρεάζει την εκτίμηση των υδραυλικών υψών καθολικά στο πεδίο και η επίδραση αυτή γίνεται εντονότερη, σε έναν ποσοτικά υποβαθμισμένο υπόγειο υδροφορέα στις περιοχές ανθρωπογενούς πίεσης. Απαντώνται δύο τρόποι αντιμετώπισης αυτού του φαινομένου, με τον καθένα να ανταποκρίνεται σε διαφορετική χωρική κλίμακα:

1. Ευρεία κλίμακα: Η συλλογή επιπλέον πληροφορίας της υδραυλικής αγωγιμότητας θα οδηγήσει στη μείωση της αβεβαιότητας για όλο το πεδίο μελέτης, ακόμη και στις περιοχές ανθρωπογενούς πίεσης.
2. Τοπική κλίμακα: Η κατάργηση των γεωτρήσεων θα επιφέρει δραστική μείωση της αβεβαιότητας στα κελιά όπου αυτές υφίστανται. Αυτός ο τρόπος θα επιφέρει, αν μη τι άλλο, θετικά αποτελέσματα στο αρνητικό ισοζύγιο του υπόγειου υδροφορέα. Ένα αποτέλεσμα που είναι πιο σημαντικό από το πρώτο.

Η απαίτηση αυτή είναι ακραία, μιας και δεν υπάρχει άλλος τρόπος για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών. Επιπλέον, η αβεβαιότητα θα μειωθεί μόνο στα κελιά των γεωτρήσεων, ενώ θα παραμένει σε όλο το υπόλοιπο πεδίο.

Στην εν λόγω έρευνα πρωτίστως προτείνεται ο πρώτος τρόπος για την καθολική μείωση της αβεβαιότητας, αλλά εν τέλει εκμεταλλευόμενοι τη λειτουργία του ταμιευτήρα δρα συμπληρωματικά και ο δεύτερος τρόπος. Τα αποτελέσματα της συνέργειας των δύο τρόπων παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο, το οποίο αφιερώνεται καθαρά στην εφαρμογή της αξίας της πληροφορίας για τη διαχειριστική περίοδο 2012-2044.

8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΞΙΑΣ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΟΝ ΥΠΟΓΕΙΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΚΑΡΛΑΣ

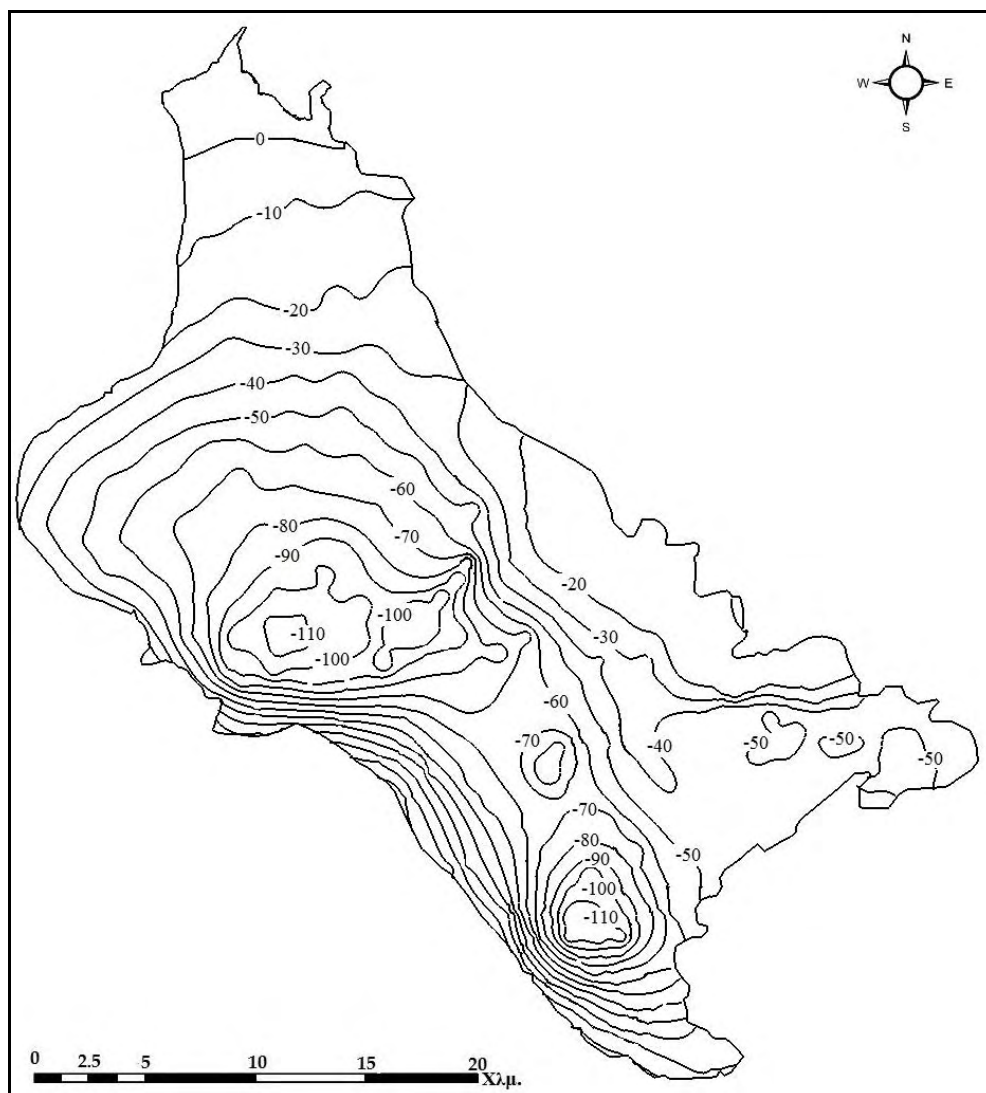
Η διαδικασία της συνεισφοράς της αξίας της πληροφορίας στη διαχείριση του υπόγειου υδροφορέα της Κάρλας ξεκινά χρονικά με τη λειτουργία του ταμιευτήρα και των υποστηρικτικών του έργων. Η διαχειριστική περίοδος είναι από την 01/2012 ως την 01/2044. Η τελευταία ημερομηνία δεν πάρθηκε τυχαία, αλλά πρόκειται για το τέλος της περιόδου, σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα του έργου ανασύστασης της λίμνης Κάρλας, κατά την οποία το υδατικό σύστημα της Κάρλας θα έρθει σε πλήρη ισορροπία και τα υδατικά αποθέματα του υπόγειου υδροφορέα θα αποκατασταθούν, από το όφελος που θα προσφέρει ο ταμιευτήρας (Μπεζές, 2004). Μέσα σε αυτή την περίοδο πραγματοποιείται η μείωση της άντλησης των υπόγειων υδάτων από την κατάργηση πλήθος ιδιωτικών γεωτρήσεων, μιας και η κάλυψη των αρδευτικών αναγκών θα πραγματοποιείται από το επιφανειακό δυναμικό του ταμιευτήρα. Η πλήρης λειτουργία του συστήματος των έργων θα ενισχύσει και τα υδατικά αποθέματα των μικρών ταμιευτήρων άρδευσης, ώστε να καλυφθεί σημαντικό μέρος των αρδευτικών αναγκών των καλλιεργειών στο κεντρικό και βόρειο τμήμα του υπόγειου υδροφορέα, στο οποίο υφίσταται το αρδευτικό δίκτυο του ΤΟΕΒ Πηνειού.

Πέρα λοιπόν της ερευνητικής καινοτομίας της εν λόγω διατριβής, προκύπτει μέσω αυτής και ένα διαχειριστικό εργαλείο του υπόγειου υδροφορέα της Κάρλας, μιας και λαμβάνονται υπόψη όλες οι προγραμματιζόμενες από το έργο μεταβολές στο υδατικό σύστημα. Το εργαλείο αυτό αποδίδει τις αποκρίσεις των εξεταζόμενων υδατικών πόρων της λεκάνης σε διάφορες στρατηγικές που ο εκάστοτε διαχειριστής μπορεί να εφαρμόσει. Προχωράει όμως και ένα βήμα παραπέρα από τους μελετητές του έργου προτείνοντας λύσεις για τη βέλτιστη διαχείριση του υπόγειου υδροφορέα, ώστε να επιτευχθεί η ανύψωση της στάθμης του.

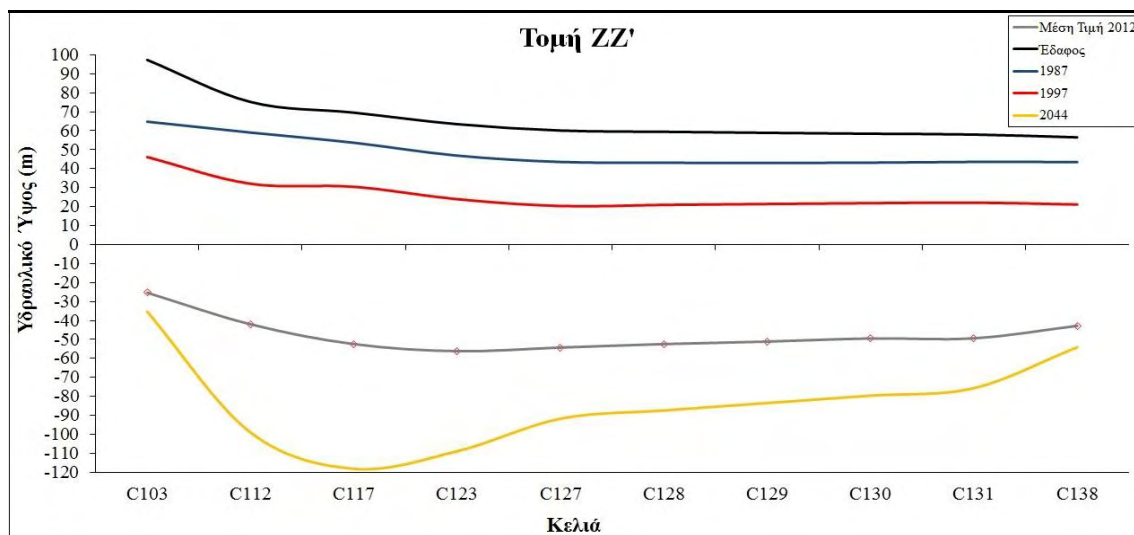
Στη διαχειριστική περίοδο 2012-2044 εμπλέκονται και τα υπόλοιπα μοντέλα προσομοίωσης-διαχείρισης (UTHRL, LAK3, GWM) από τα οποία τα αποτελέσματα των δύο πρώτων παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η εφαρμογή και τα αποτελέσματα του μοντέλου βελτιστοποίησης του υπόγειου υδροφορέα παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο, μιας και όπως έχει αναφερθεί, η αξία της πληροφορίας θα εφαρμοστεί στις βέλτιστες λύσεις που το GWM θα δώσει για την κάθε μια στοχαστική απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα.

Προτού εφαρμοστεί το διαχειριστικό εργαλείο, έγινε, για καθαρά συγκριτικούς λόγους, μια «απόπειρα» ντετερμινιστικής εφαρμογής του μοντέλου υπόγειας ροής για τη διαχειριστική περίοδο 2012-2044 με βάση το σενάριο «do nothing», στο οποίο υποτίθεται πως δεν υφίσταται το έργο ανασύστασης της Κάρλας και συνεχίζεται η υφιστάμενη κατάσταση. Η λέξη «απόπειρα» οφείλεται στο γεγονός πως χρησιμοποιήθηκε η αδρή παραδοχή της επανάληψης των αντλήσεων, γεγονός το οποίο αν μη τι άλλο δεν μπορεί να αντικατροπτίζει τη μελλοντική πραγματικότητα. Στον χάρτη του Σχήματος 8.1 παρουσιάζονται τα υδραυλικά ύψη, σε τιμές απόλυτου

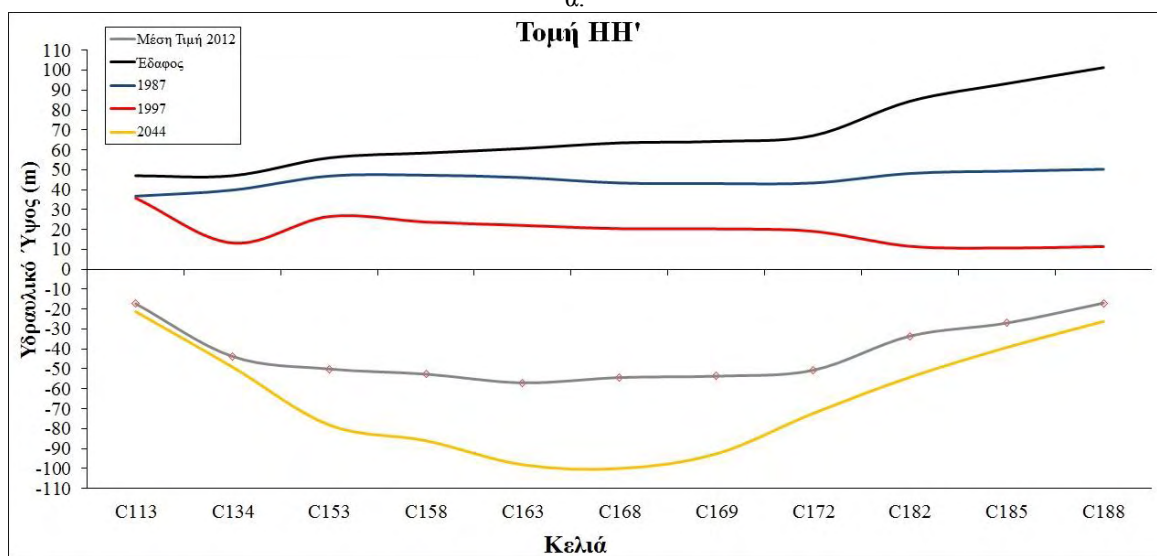
υψομέτρου, του υπόγειου υδροφορέα για την 01/2044 για αυτήν την κατάσταση. Στα γραφήματα του Σχήματος 8.2 παρουσιάζονται τα υδραυλικά ύψη στα επιλεγμένα κελιά και για την 01/2044 για τις τομές ZZ' και HH'.



Σχήμα 8. 1. Χάρτης υδραυλικών υψών του υπόγειου υδροφορέα την 01/2044 για το σενάριο «do nothing»



α.



β.

Σχήμα 8. 2. Υδραυλικά ύψη των επιλεγμένων κελιών για τις διάφορες ημερομηνίες και υψόμετρο του εδάφους στις τομές α. ΖΖ' και β. ΗΗ'

Είναι λογικό πως εφόσον παραμείνει η υπάρχουσα κατάσταση, η ταπείνωση του υπόγειου υδροφορέα θα συνεχίζεται. Για να μη φτάσει ο υπόγειος υδροφορέας σε αυτήν την κατάσταση, η εν λόγω έρευνα προτείνει, μέσω του εργαλείου αυτού, μια στρατηγική διαχείρισης, η οποία όχι μόνο θα τον προστατεύσει από την ποσοτική του υποβάθμιση, αλλά θα αποφέρει και στον διαχειριστή το βέλτιστο κέρδος από τις πωλήσεις του επιτρεπόμενου ανανεώσιμου υπόγειου ύδατος. Όλα αυτά εκμεταλλευόμενοι το έργο της ανασύστασης της Κάρλας και λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της αβεβαιότητας της χωρικής μεταβλητότητας και της έλλειψης επαρκών δειγματοληπτικών μετρήσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας στην εκτίμηση των παραγόμενων υδραυλικών υψών.

8.1. Το πρόβλημα της στοχαστικής βελτιστοποίησης

Στην εν λόγω έρευνα εφαρμόζεται η Monte Carlo προσέγγιση της στοχαστικής βελτιστοποίησης, η οποία έχει παρουσιαστεί στο υποκεφάλαιο 3.4. Για κάθε πραγμάτωση του υπόγειου υδροφορέα λύνεται το πρόβλημα της βελτιστοποίησης χωριστά. Στόχος του προβλήματος αυτού, μέσω του οποίου καθορίζεται και η στρατηγική διαχείρισης του υπόγειου υδροφορέα, είναι να πραγματοποιηθούν οι επιτρεπόμενες απολήψεις υπόγειου ύδατος, για να επιτευχθεί το μέγιστο καθαρό κέρδος από την πώληση αυτού, με την «απαράβατη» προϋπόθεση αυτός να επανέλθει σε βάθος χρόνου σε κατάσταση μη εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων αποθεμάτων του. Η πώληση του ύδατος αποσκοπεί στην κάλυψη των αρδευτικών αναγκών των καλλιεργειών, μιας και το νέο αρδευτικό δίκτυο δεν θα καλύπτει όλο το πεδίο μελέτης. Αλλά ακόμη και στην περιοχή του νέου αρδευτικού δικτύου, μόνο στη ζώνη 1 θα απαγορευθεί η χρήση των γεωτρήσεων άντλησης, όπως προβλέπεται από τους κατασκευαστές του έργου, με τις γεωτρήσεις των άλλων ζωνών να παραμένουν ως έχουν και να λειτουργούν σε περίπτωση που η ζήτηση για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών ξεπεράσει τα $46 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ το χρόνο. Ο χρονικός ορίζοντας μέσα στον οποίο τίθεται ο στόχος αυτός είναι η διαχειριστική περίοδος 2012-2044. Η πρότερη κατάσταση, στην οποία επιχειρείται να επανέλθει ο υπόγειος υδροφορέας είναι το έτος 1987. Από την εικόνα του υπόγειου υδροφορέα, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.36 για το 2012, μέσω της ποσοτικής εξυγίανσής του, στόχος είναι το 2044 να παρουσιάσει την εικόνα του Σχήματος 7.25. Το έτος 1987 δεν επιλέχθηκε τυχαία. Είναι ένας στόχος «μη ουτοπικός» μιας και τότε υπήρχε άντληση υπόγειων υδάτων για την κάλυψη αρδευτικών αναγκών. Δεν αναζητήθηκαν δηλαδή παλαιότερες χρονιές στις οποίες η άντληση ήταν ασήμαντη, λόγω της μη ανάπτυξης του αγροτικού τομέα. Αλλά η αντλούμενη ποσότητα δεν προερχόταν από τα μη ανανεώσιμα αποθέματα και το υδατικό ισοζύγιο του υπόγειου υδροφορέα ήταν θετικό. Άλλωστε, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο την αμέσως επόμενη χρονιά ξεκίνησε η πτωτική τάση των των πιεζομέτρων. Είναι λογικό επίσης, να περιμένει κανείς πως ο όγκος του μέγιστου επιτρεπόμενου αντλούμενου υπόγειου ύδατος, για τη διαχειριστική περίοδο, θα είναι σίγουρα μικρότερος από τον αντίστοιχο των ανανεώσιμων αποθεμάτων, μιας και για να επιτευχθεί αυτή η ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα απαιτείται τη δέσμευση/αποθήκευση σημαντικού μέρους των ανανεώσιμων αποθεμάτων.

Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Maximize} \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N ((A * Q_n^t - C * n(1 - e^{-100Q_n^t}))) \quad (8.1)$$

$$h_i^{2044} \geq h_i^{1987}, i = 1, \dots, N \quad (8.2)$$

$$Q_n \geq 0 \text{ m}^3 / \text{s}, n = 1, \dots, N \quad (8.3)$$

όπου:

- Q_n η παροχή άντλησης των πηγαδιών m^3/d ,

- N ο αριθμός των πηγαδιών,
- T ο αριθμός των περιόδων πίεσης για τη διαχειριστική περίοδο 2012-2044,
- h_i το υδραυλικό ύψος στο κελί i με εκθέτη τη χρονιά.
- i το κελί ελέγχου, στο οποίο υφίσταται πηγάδι άντλησης
- A η αξία του αρδευτικού νερού ίση με 0.06 ευρώ/ m^3 (Fafoutis et. al., 2011)
- C το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης 2.5 γεωτρήσεων του ΤΟΕΒ Κάρλας, ίσο με 9000 ευρώ/έτος (6500 ευρώ ΔΕΗ, 2500 ευρώ συντήρησης),

Η αντικειμενική συνάρτηση της εξίσωσης 8.1 προσβλέπει στη μεγιστοποίηση του καθαρού κέρδους από την πώληση του υπόγειου νερού προς άρδευση. Για τον λόγο αυτό αφαιρείται από τα έσοδα, τα οποία δίνονται από τον όρο $A * Q_n^t$, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης των γεωτρήσεων, το οποίο δίνεται από τον όρο $C * n$. Όμως το κόστος το οποίο έχει θεωρηθεί στην εν λόγω εξίσωση, ανταποκρίνεται για 2.5 γεωτρήσεις, και αυτό οφείλεται στην παραδοχή που είχε παρθεί με την αντικατάσταση 2 με 3 γεωτρήσεων του πεδίου με μία. Ο Ψιλοβίκος (1999), στη διδακτορική του διατριβή, εκτίμησε το ετήσιο κόστος λειτουργίας μιας γεώτρησης ίσο με 1200000 δρχ. δηλ. 3520 ευρώ. Ο Μήτσιου (2008), στη μεταπτυχιακή του διατριβή το έλαβε ίσο με 100 ευρώ/ημ. δηλαδή 3650 ευρώ/έτος. Στο ίδιο εύρος τιμών κυμαίνεται και το αντίστοιχο κόστος των γεωτρήσεων που έχει στην κυριότητά του το ΤΟΕΒ Κάρλας. Η αξία του αρδευτικού νερού ανταποκρίνεται στη μέση τιμή της τωρινής αξίας του για τη λεκάνη της Κάρλας, έτσι όπως προέκυψε από τους Φαφούτης και συνεργάτες (2011). Ο περιορισμός του υδραυλικού ύψους εκφράζει την ανύψωση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα στο επίπεδο του 1987.

Λόγω του φρεάτιου υδροφορέα, η σχέση της παροχής με το υδραυλικό ύψος δεν είναι γραμμική (τιμή του υδραυλικού φορτίου λόγω της λειτουργίας γεώτρησης άντλησης σε φρεάτιο υδροφορέα) και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$H^2 - H_o^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{r}{R} \quad (8.4)$$

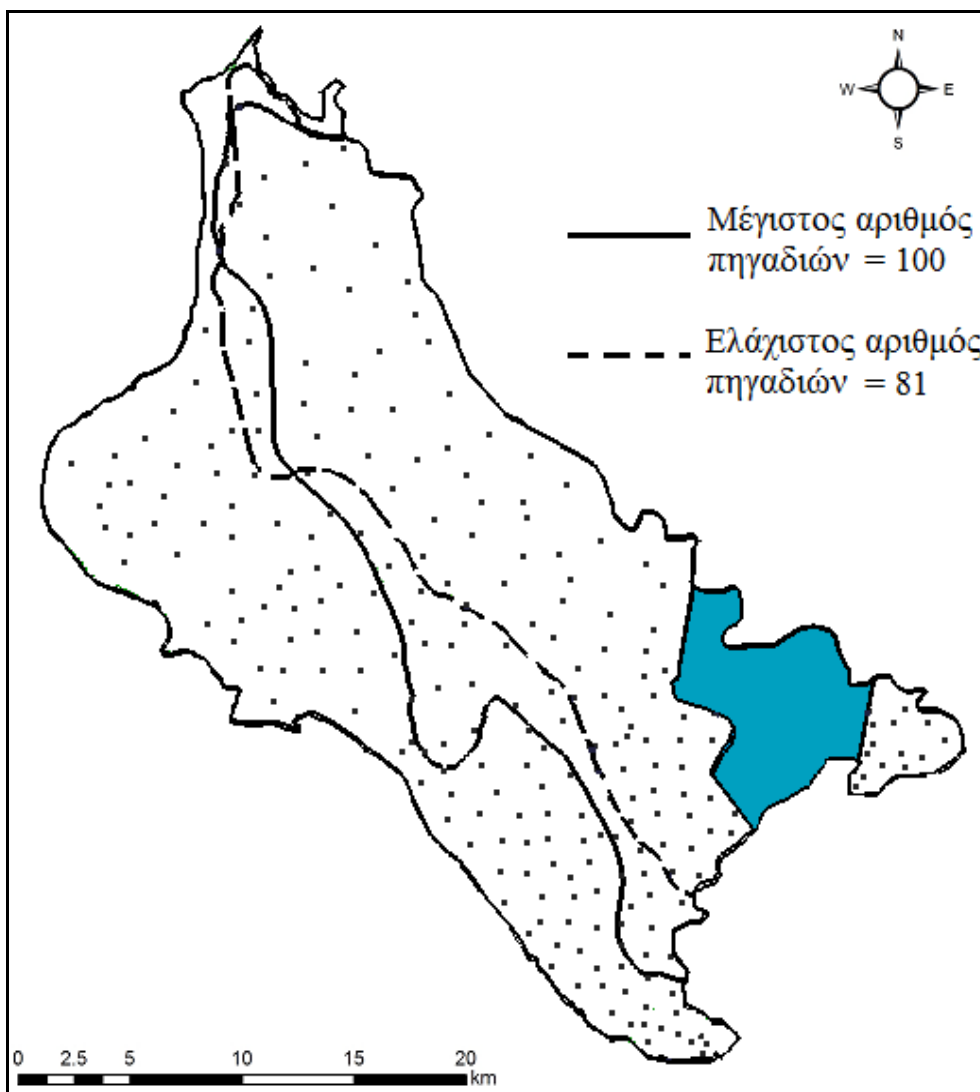
όπου:

- H, η τιμή του υδραυλικού φορτίου στη θέση ελέγχου (m)
- H_o , η αρχική τιμή του υδραυλικού φορτίου στη θέση ελέγχου (m)
- Q, η παροχή άντλησης (m^3/s)
- r, η ακτίνα επιρροής της γεώτρησης (m)
- R, η απόσταση της θέσης ελέγχου από τη γεώτρηση (m)
- K, υδραυλική αγωγιμότητα (m/s)

Αυτή η σχέση καθιστά μη γραμμικό το πρόβλημα της βελτιστοποίησης. Όμως η χρήση του αλγόριθμου σειριακού γραμμικού προγραμματισμού (SLP), μέσω των επαναλαμβανόμενων γραμμικοποιήσεων της εξίσωσης 8.4 με τη χρήση αναπτυγμάτων Taylor (Εξ. 6.94) καθιστά τη σχέση αυτή γραμμική. Εκφράζοντας τη διαφορά του υδραυλικού φορτίου ως πτώση πληρείται η γραμμικότητα πλέον ανάμεσα στην πτώση του υδραυλικού φορτίου και στην παροχή και τίθεται σε εφαρμογή η χρήση του μητρώου απόκρισης, όπως περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 6.6.2.

8.2. Εκ των προτέρων κατάσταση

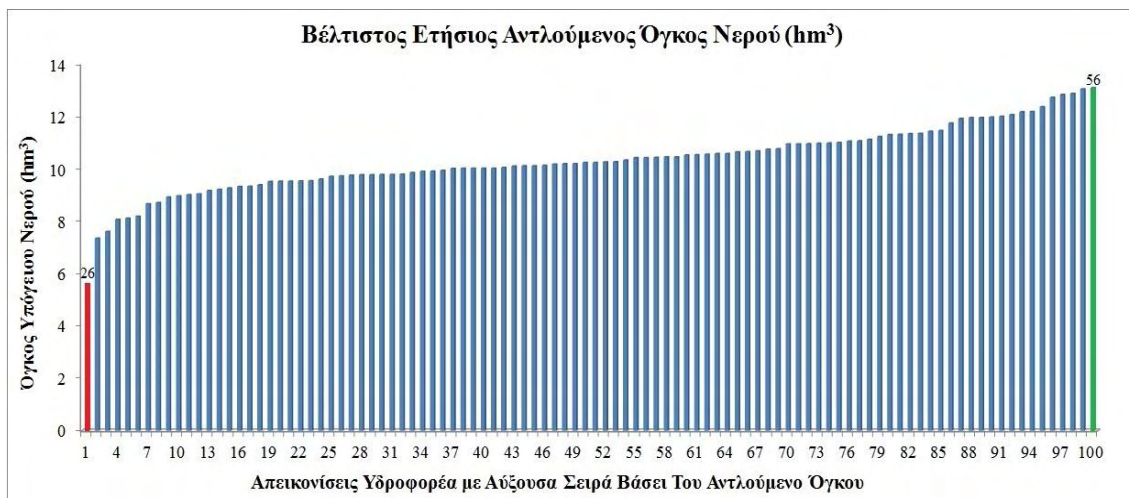
Σε αυτή την κατάσταση, η πληροφορία της υδραυλικής αγωγιμότητας έγκειται στις 15 δειγματοληπτικές τιμές, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 7.4 και οι θέσεις τους στον χάρτη του Σχήματος 7.15. Λόγω της σημαντικής ταπείνωσης του υπόγειου υδροφορέα, πραγματοποιήθηκε πρώτα μια αρχική εφαρμογή του μοντέλου υπόγειας ροής χωρίς την παρουσία γεωτρήσεων και για τις 100 στοχαστικές απεικονίσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας. Ο λόγος ήταν να βρεθούν εκείνες οι περιοχές του υπόγειου υδροφορέα, από τις οποίες θα μπορεί να αντληθεί υπόγειο νερό, ώστε να συμμετάσχουν οι συγκεκριμένες υφιστάμενες γεωτρήσεις στο πρόβλημα διαχείρισης. Αυτό προκύπτει από την αφαίρεση του χάρτη 7.25 των υδραυλικών υψών της 01/1987 (που είναι ο στόχος) με τον κάθε έναν από τους 100 χάρτες που έδωσε η εφαρμογή του MODFLOW χωρίς γεωτρήσεις για την 01/2044. Η διαδικασία αυτή έγινε για λόγους οικονομίας χρόνου μιας και έτσι αποκλείονται από το πρόβλημα της βελτιστοποίησης οι γεωτρήσεις εκείνες, για τις οποίες ο διαχειριστής γνωρίζει ήδη εκ των προτέρων πως δε δύναται να αντλήσουν υπόγειο νερό. Στον χάρτη του Σχήματος 8.3 παρουσιάζεται με μαύρη συνεχόμενη γραμμή το όριο εκείνο για το οποίο συμμετέχουν οι περισσότερες γεωτρήσεις στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Το όριο αυτό δεν είναι τίποτε άλλο από την ισοδυναμική γραμμή του μηδέν και προέκυψε από την αφαίρεση των υδραυλικών υψών του 1987 με των αντίστοιχων του 2044 από μία εκ των 100 απεικονίσεων. Αυτή λοιπόν η απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα έδωσε την μεγαλύτερη περιοχή, σε σχέση με τις άλλες, μέσα στην οποία θα επιτραπεί η άντληση υπόγειου νερού. Η περιοχή αυτή είναι το ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης σε σχέση με το όριο της συνεχούς μαύρης γραμμής. Ενώ, από την άλλη το όριο με τη διακεκομμένη γραμμή προέρχεται από εκείνη την απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα που δίνει τη μικρότερη περιοχή προς άντληση και άρα τον μικρότερο αριθμό γεωτρήσεων. Και εδώ η περιοχή αυτή είναι η ανατολική από το όριο.



Σχήμα 8. 3. Τα όρια της μεγαλύτερης και μικρότερης περιοχής του υπόγειου υδροφορέα, από τις οποίες επιτρέπεται να αντληθεί υπόγειο νερό

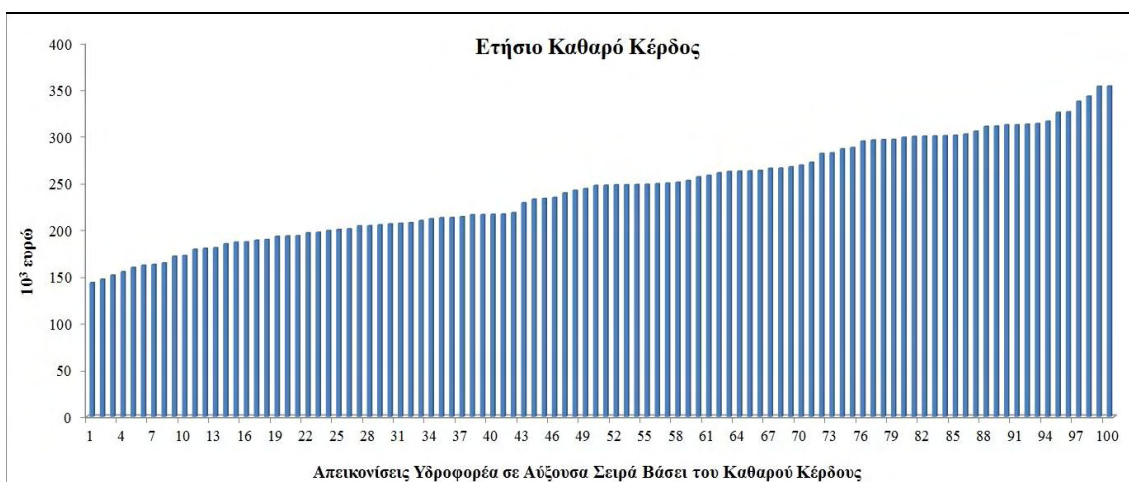
Τα όρια των υπόλοιπων 98 απεικονίσεων τοποθετούνται ανάμεσα σε αυτές τις δύο γραμμές. Ο παραπάνω χάρτης αποτελεί ουσιαστικά το πρώτο αποτέλεσμα της επίδρασης της αβεβαιότητας της υδραυλικής αγωγιμότητας πάνω στη διαχείριση του υπόγειου υδροφορέα. Η επίδραση της αβεβαιότητας είναι σημαντική μιας και το εύρος του αριθμού των πηγαδιών που θα συμμετάσχουν στη διαχείριση φτάνει μέχρι και το 20% του μέγιστου αριθμού. Εφόσον καθορισθεί ποιες και πόσες υφιστάμενες γεωτρήσεις θα λάβουν μέρος στο πρόβλημα βελτιστοποίησης ξεκινά η εφαρμογή του προβλήματος της βελτιστοποίησης με τη χρήση του GWM για την περίοδο 2012-2044. Η εφαρμογή αυτή δίνει για κάθε απεικόνιση τη θέση και τον αριθμό των πηγαδιών, από τα οποία πραγματοποιείται η άντληση, τη βέλτιστη τιμή αυτής και το καθαρό κέρδος από την πώληση του νερού. Στο γράφημα του Σχήματος 8.4 παρουσιάζονται οι βέλτιστοι ετήσιοι αντλούμενοι όγκοι υπόγειου νερού που προέκυψαν για κάθε απεικόνιση. Οι απεικονίσεις τοποθετούνται σε αύξουσα σειρά με βάση τον αντλούμενο όγκο. Για την απεικόνιση που έδωσε τον ελάχιστο αντλούμενο όγκο (κόκκινη στήλη) παρουσιάζεται και ο αριθμός των γεωτρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν (26 γεωτρήσεις).

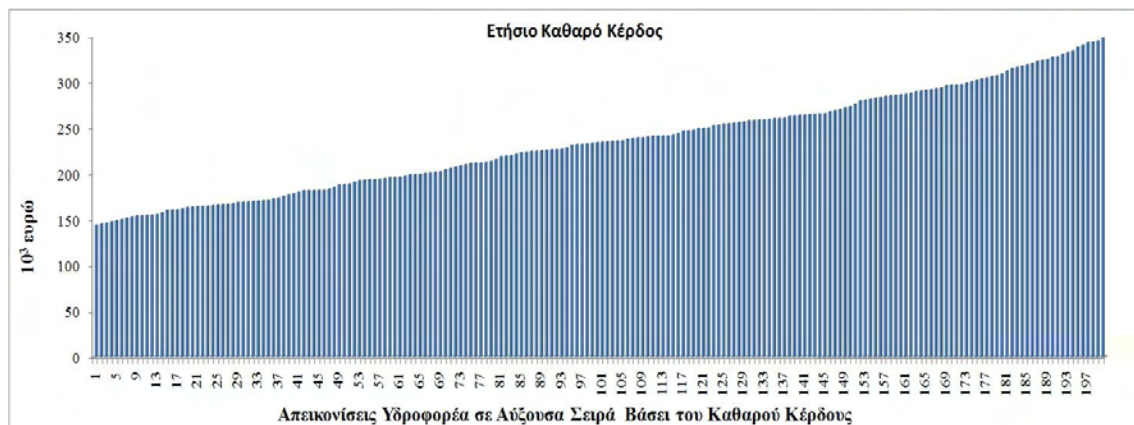
Το αντίστοιχο γίνεται και για την απεικόνιση που έδωσε τον μέγιστο αντλούμενο όγκο νερού (56 γεωτρήσεις).



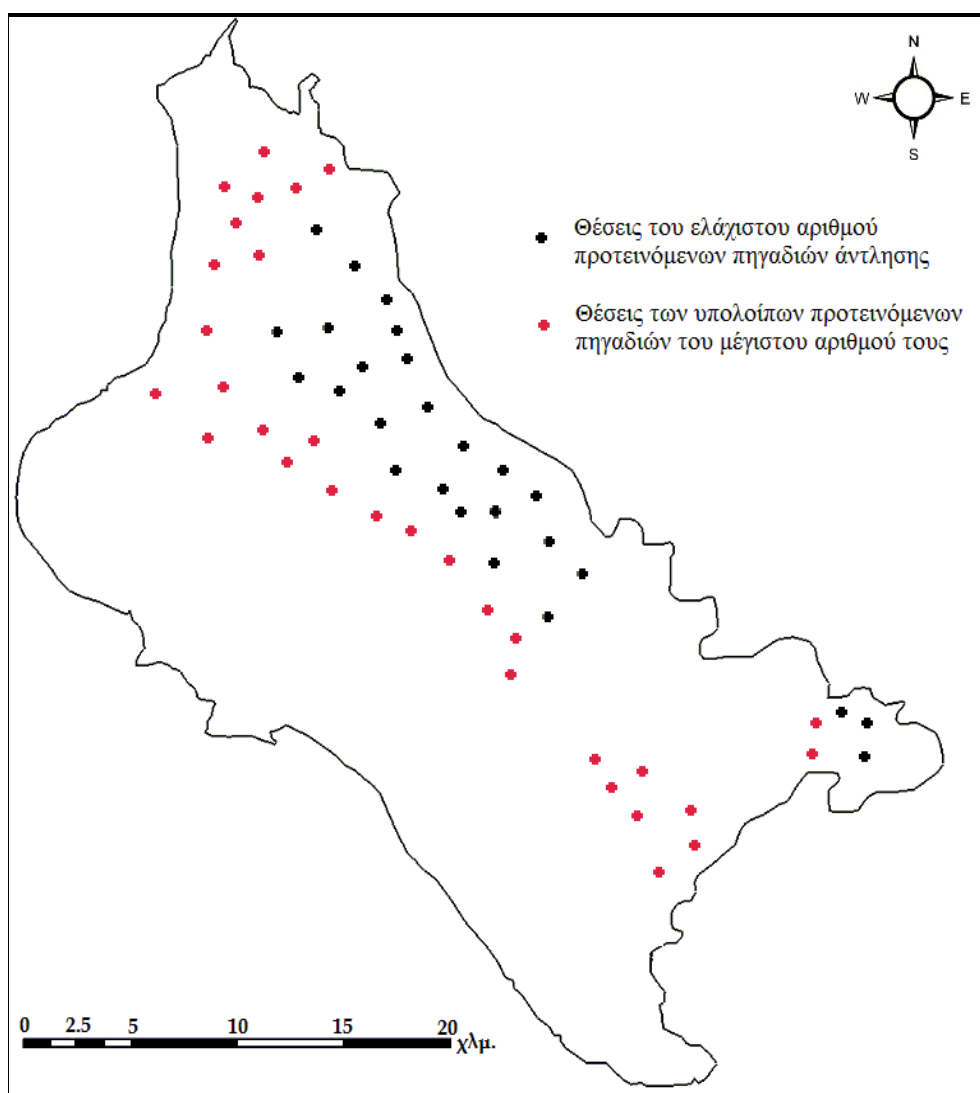
Σχήμα 8. 4. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα

Ο ελάχιστος ετήσιος όγκος νερού, ο οποίος αντλείται από 26 γεωτρήσεις είναι μόλις 5.6 hm^3 , ενώ ο μέγιστος, ο οποίος αντλείται από 56 γεωτρήσεις φτάνει τα 13.07 hm^3 . Αυτό το σημαντικό εύρος του αντλούμενου υπόγειου ύδατος, οφείλεται στην επίδραση που έχει η αβεβαιότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας στην εκτίμηση των υδραυλικών υψών του υπόγειου υδροφορέα, η οποία φιλτράρεται μέσω του προβλήματος βελτιστοποίησης και αποτυπώνεται σε όγκους νερού. Αυτή η αβεβαιότητα είναι υπεύθυνη για την εμφάνιση του ρίσκου στις αποφάσεις που πρέπει να πάρει ο διαχειριστής για τη χάραξη των στρατηγικών διαχείρισης, διότι αποτιμάται πλέον με οικονομικούς όρους. Στο γράφημα 8.5.α παρουσιάζονται τα ετήσια καθαρά κέρδη για κάθε απεικόνιση, πάλι σε αύξουσα σειρά. Το σχήμα 8.5.β παρουσιάζει τα ίδια αποτελέσματα, αλλά για 200 απεικονίσεις, για τον έλεγχο της προσομοίωσης Monte Carlo, ο οποίος είχε αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στον χάρτη του Σχήματος 8.6 φαίνονται οι θέσεις των πηγαδιών άντλησης για δύο ακραίες περιπτώσεις (ελάχιστος αριθμός και μέγιστος αριθμός)





Σχήμα 8. 5. Διάγραμμα ετήσιου καθαρού κέρδους για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα για: α.) 100 πραγματώσεις και β.) 200 πραγματώσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας.

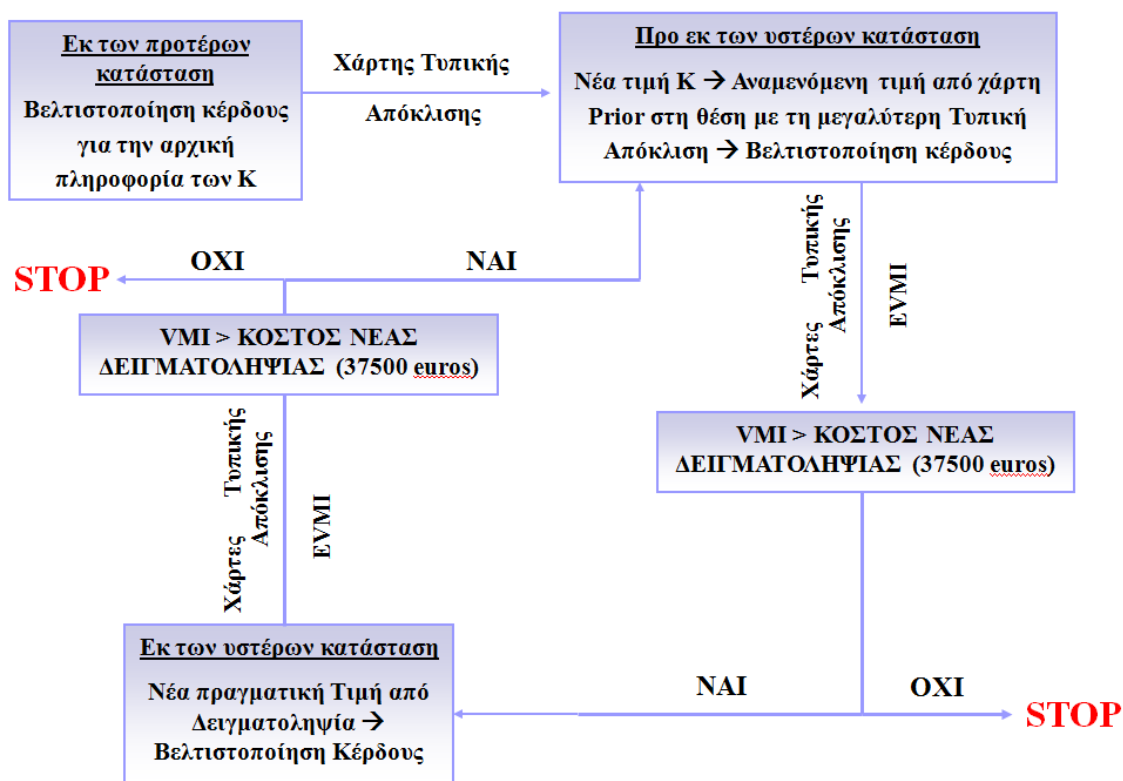


Σχήμα 8. 6. Θέσεις των γεωτρήσεων άντλησης για τις απεικονίσεις του υπόγειου υδροφορέα με τον μέγιστο και ελάχιστο αριθμό αυτών

Το ελάχιστο ετήσιο καθαρό κέρδος που μπορεί να αποκτήσει ο διαχειριστής, για τις 200 απεικονίσεις, είναι 144230,5 ευρώ, ενώ το μέγιστο φτάνει τα 3348688,53 ευρώ (Σχήμα 8.5α). Η διαφορά τους είναι 204458 ευρώ. Το ελάχιστο ετήσιο καθαρό κέρδος που μπορεί να αποκτήσει ο διαχειριστής, για τις 100 απεικονίσεις, είναι 143500 ευρώ, ενώ το μέγιστο φτάνει τα 353917 ευρώ. Η διαφορά τους είναι 210417 ευρώ. Εξαιτίας της μικρής διαφοράς ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις προτιμήθηκε η περίπτωση των 100 πραγματώσεων. Επομένως, η αβεβαιότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας οδηγεί σε μια οικονομική αβεβαιότητα της τάξεως των 210417 ευρώ ετησίως. Αυτό το πόσο αναπαρίσταται στο Σχήμα 4.1 με το μαύρο πλαίσιο της εκ των προτέρων κατάστασης. Εδώ φαίνεται καθαρά, πόσο σημαντική είναι η επίδραση της αβεβαιότητας, όταν αυτή πλέον αποτιμάται σε οικονομικούς όρους. Και εδώ φαίνεται με τον πιο γλαφυρό τρόπο αυτό το οποίο διατυπώθηκε στο υποκεφάλαιο 7.5.6, για τον λόγο που επιστρατεύθηκε η αξία της πληροφορίας ως εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων του διαχειριστή. Άλλη βαρύτητα έχει η αβεβαιότητα στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, εξετάζοντάς την καθαρά από την ερευνητική σκοπιά και άλλη βαρύτητα έχει πλέον πάνω στα αποτελέσματα της διαχείρισης, όταν προπάντων σε αυτήν εισέρχονται οικονομικοί όροι. Η οικονομική αβεβαιότητα της τάξεως των 210417 ευρώ ετησίως καθιστά απαγορευτική τη λήψη οποιασδήποτε απόφασης για τη διαχείριση του υπόγειου υδροφορέα, διότι αν μη τι άλλο δημιουργεί άμεσο κίνδυνο ως προς τη βιωσιμότητα του φορέα διαχείρισης. Εδώ έρχεται η αξία της πληροφορίας να απαντήσει σε αυτό το πρόβλημα. Δίνει την ευκαιρία στον διαχειριστή να βελτιώσει την πληροφορία που έχει για την υδραυλική αγωγιμότητα, ώστε να μειωθεί αυτή η οικονομική αβεβαιότητα, αλλά υπό συμφέρουσες για αυτόν οικονομικές συνθήκες. Ο διαχειριστής έχει τη δυνατότητα να επενδύσει κάποια χρήματα ετησίως σε στρατηγική λήψης δειγματοληπτικών δεδομένων υδραυλικής αγωγιμότητας, ώστε να πετύχει τον εν λόγω στόχο. Αλλά η αξία της πληροφορίας τον προστατεύει από επιπλέον σπατάλη, ορίζοντας ως όριο της οικονομικής αβεβαιότητας το κόστος λήψης της νέας τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας. Έτσι, λοιπόν η λήψη νέων μετρήσεων της εν λόγω παραμέτρου θα σταματήσει όταν η οικονομική αβεβαιότητα γίνει μικρότερη του κόστους λήψης νέας πληροφορίας. Εδώ ακριβώς βρίσκεται και η επιτομή της εν λόγω έρευνας. Το διαχειριστικό εργαλείο, το οποίο προτείνεται, δεν προσβλέπει μόνο στην προστασία και εξυγίανση των υδατικών πόρων της λεκάνης και δη των υπογείων, αλλά αποσκοπεί και στην οικονομική βιωσιμότητα του διαχειριστή, προστατεύοντάς τον από τα οικονομικά ρίσκα που η έλλειψη επαρκούς πληροφορίας υδραυλικών παραμέτρων μπορεί να αποφέρει.

Από αυτό το σημείο ξεκινά η εφαρμογή της διαδικασίας της αξίας της πληροφορίας κάνοντας χρήση των τριών καταστάσεων της Bayes ανάλυσης πάνω στις βέλτιστες για τη διαχείριση λύσεις του υπόγειου υδροφορέα. Πρόκειται για μια επαναληπτική μέθοδο λήψης δειγματοληπτικών μετρήσεων με στόχο τη μείωση της υδρογεωλογικής αβεβαιότητας, η οποία στο πλαίσιο της διαχείρισης του υπόγειου υδροφορέα μεταφράζεται σε οικονομική αβεβαιότητα. Στο Σχήμα 8.7 παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα της διαδικασίας αυτής. Πρέπει να σημειωθεί πως το σημερινό κόστος μιας δοκιμαστικής άντλησης στο πεδίο, από την οποία θα προκύψει η νέα τιμή της

υδραυλικής αγωγιμότητας κοστολογείται στα 37500 ευρώ. Επομένως, αυτό το ποσό καθορίζει αν συμφέρει τον διαχειριστή να λάβει και επιπλέον μέτρηση από το πεδίο.



Σχήμα 8. 7. Λογικό διάγραμμα της διαδικασίας της αξίας της πληροφορίας

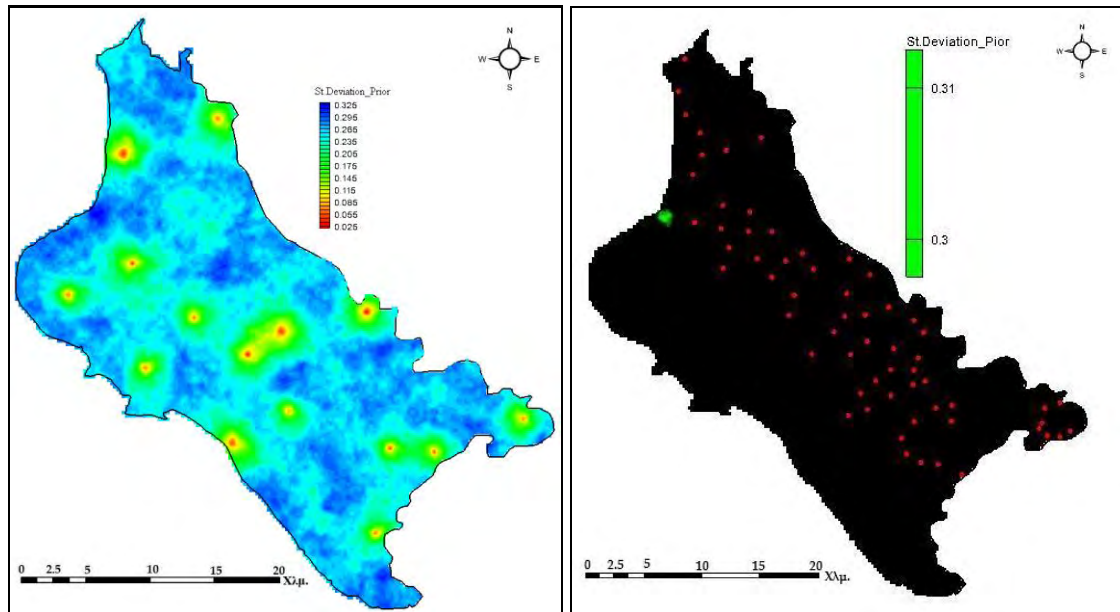
Η εκ των προτέρων κατάσταση έδειξε πως απαιτείται η λήψη νέας δειγματοληπτικής τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας. Η στρατηγική της εύρεσης της θέσης της τιμής αυτής στο πεδίο, προήλθε από την εργασία του Wagner (1999). Η θέση αυτή βρίσκεται στο κελί του καννάβου, στο οποίο η τυπική απόκλιση της υδραυλικής αγωγιμότητας έχει τη μέγιστή της τιμή στο πεδίο. Η τυπική απόκλιση αποτελεί από τα πιο βασικά στατιστικά εργαλεία για την εκτίμηση της αβεβαιότητας. Εκεί που οι τιμές της αυξάνονται, αυξάνεται και η αβεβαιότητα. Με τη λήψη νέας δειγματοληπτικής τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας στη θέση αυτή και με τη χρήση της εξαρτημένης προσομοίωσης, η τυπική απόκλιση αυτής και άρα η αβεβαιότητα σχεδόν μηδενίζονται και μειώνονται σημαντικά στη γειτονική περιοχή. Η εξάλειψη λοιπόν των μεγαλύτερων τιμών της τυπικής απόκλισης από το πεδίο, και άρα της αβεβαιότητας, αποτελεί τον πιο αποτελεσματικό τρόπο για τη μείωσή της. Ο χάρτης των τυπικών αποκλίσεων δεν είναι άλλος από αυτόν που προέρχεται από τις 100 στοχαστικές πραγματώσεις (χάρτες) της υδραυλικής αγωγιμότητας, που η SGSIM δίνει για κάθε κατάσταση (εκ των προτέρων, προ εκ των υστέρων και εκ των υστέρων). Η αξία της νέας μέτρησης (Value of Measurement Information) εκτιμάται ως η συνεισφορά της στη μείωση της οικονομικής αβεβαιότητας, δηλαδή ως η διαφορά αναμέσα στην οικονομική αβεβαιότητα των δύο καταστάσεων. Όπως ειπώθηκε προηγουμένως η οικονομική αβεβαιότητα της εκ των προτέρων κατάστασης, πριν καν ξεκινήσει δηλαδή η συνεισφορά της αξίας της

πληροφορίας, εκτιμήθηκε στα 210417 ευρώ ετησίως. Αναμένεται λοιπόν η νέα μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας να μειώσει την οικονομική αυτή αβεβαιότητα. Όμως, για να είναι σίγουρος ο διαχειριστής πως η νέα τιμή θα έχει θετική συνεισφορά γίνεται μια θεωρητική λήψη της νέας τιμής από το χάρτη των μέσων τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας. Αυτό γίνεται στην προ εκ των υστέρων κατάσταση. Επειδή η νέα τιμή αυτή δεν είναι η πραγματική, στην προ εκ των υστέρων κατάσταση δεν υπολογίζεται νέο ημιβαριόγραμμα και δεν πραγματοποιείται νέα χωρική παρεμβολή της παραμέτρου με την απλή Kriging, αλλά συμμετέχει στην εξάρτηση των παραγόμενων αποτελεσμάτων μέσω της στοχαστικής προσομοίωσης. Έτσι, οι 100 νέοι εξαρτημένοι στοχαστικοί χάρτες, που θα παραχθούν, θα εισαχθούν στο μοντέλο της υπόγειας ροής για να δώσει με τη σειρά του 100 απεικονίσεις του υπόγειου υδροφορέα για τη διαχειριστική περίοδο 2012-2044. Πάνω σε αυτές τις απεικονίσεις θα εφαρμοστεί το πρόβλημα της βελτιστοποίησης και στις βέλτιστες λύσεις αυτές θα εκτιμηθεί η νέα οικονομική αβεβαιότητα. Αν όντως επέλθει μείωση της οικονομικής αβεβαιότητας, τότε θα σημαίνει πως όντως αξίζει ο διαχειριστής να ξοδεύει 37500 ευρώ για να πάρει την πραγματική τιμή από το πεδίο. Τότε η διαδικασία εισέρχεται στην εκ των υστέρων κατάσταση. Γίνεται η λήψη της πραγματικής δειγματοληπτικής τιμής από την εν λόγω και καταρτίζεται νέο ημιβαριόγραμμα, με 16 πλέον τιμές, οι οποίες και παρεμβάλλονται χωρικά με την απλή Kriging. Επαναλαμβάνεται η διαδικασία της στοχαστικής προσομοίωσης-βελτιστοποίησης και προκύπτει μια VMI της νέας πληροφορίας. Αν αυτή είναι μικρότερη από το κόστος της δειγματοληψίας η διαδικασία σταματά, μιας και από το σημείο αυτό και έπειτα η συνεισφορά της αξίας της πληροφορίας θα παύει να είναι οικονομικά συμφέρουσα. Το εύρος της αβεβαιότητας θα έχει μειωθεί σημαντικά μειώνοντας επίσης σημαντικά και όποιο ρίσκο προέρχεται από αυτήν την αβεβαιότητα. Αν είναι μεγαλύτερη, επαναλαμβάνεται η διαδικασία ανάμεσα στην προ εκ των υστέρων και στην εκ των υστέρων κατάσταση. Η διαφορά ανάμεσα στη θεωρητική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας της προ εκ των υστέρων κατάστασης, η οποία προέρχεται από τον χάρτη των μέσων τιμών αυτής, και της πραγματικής αποτελεί έναν σημαντικό δείκτη της μείωσης της αβεβαιότητας. Θα αποδειχθεί πως με την κτήση ολόένα και περισσότερων μετρήσεων από το πεδίο η διαφορά αυτή θα μειώνεται, που σημαίνει πως ο μέσος όρος θα πλησιάζει την πραγματική κατάσταση του πεδίου τιμών της παραμέτρου.

8.3. Προ εκ των υστέρων κατάσταση#1

Στο Σχήμα 8.8.α παρουσιάζεται ο χάρτης των τυπικών αποκλίσεων από τις 100 εξαρτημένες προσομοιώσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των προτέρων κατάσταση. Στις θέσεις των δειγματοληπτικών μετρήσεων η τυπική απόκλιση είναι μηδέν και αυξάνεται με την απόσταση από αυτές. Ήδη υπάρχουν κάποιες θέσεις στις οποίες οι τιμές της τυπικής απόκλισης είναι σημαντικές. Αλλά, όπως προστάζει η διαδικασία, η θέση για τη νέα μέτρηση, είναι αυτή με τη μέγιστη τιμή της τυπικής απόκλισης. Για αυτόν τον λόγο κατασκευάστηκε ο χάρτης του Σχήματος 8.8.β, στον οποίο φαίνεται η θέση αυτή με πράσινο χρώμα. Οι κόκκινες βούλες είναι οι θέσεις των γεωτρήσεων άντλησης που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση για την εκ των

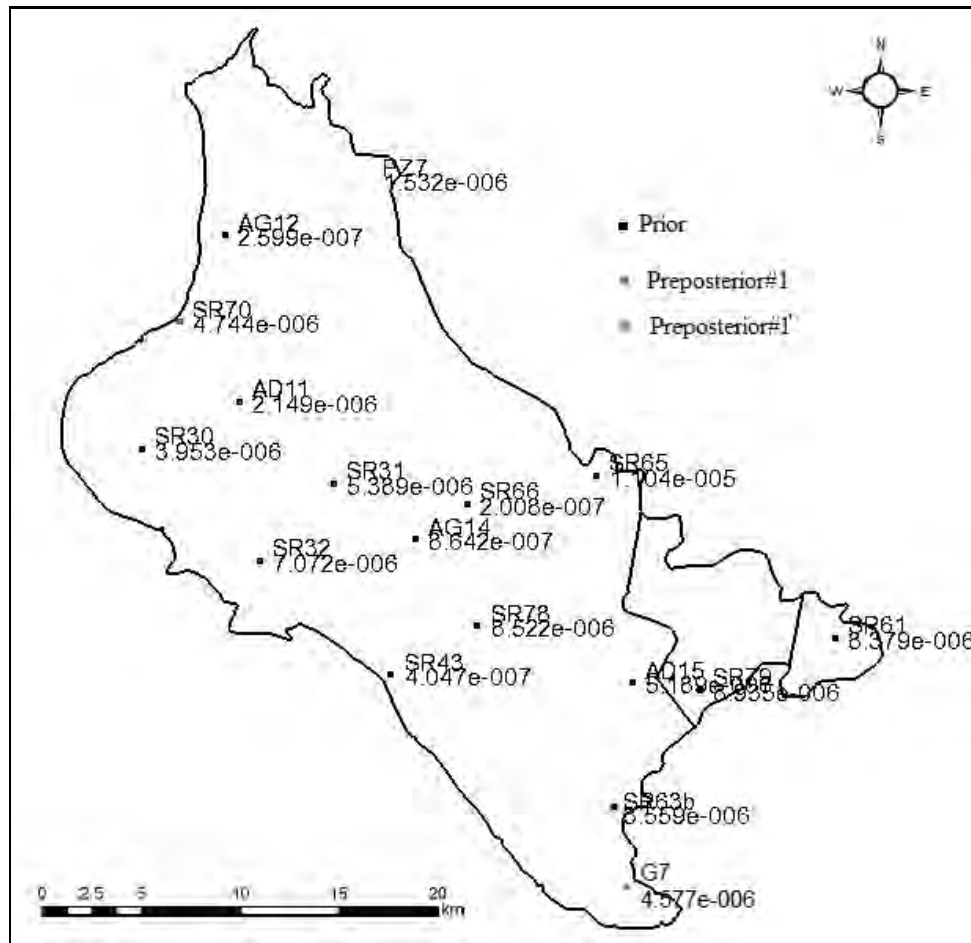
προτέρων κατάσταση. Για λόγους επιβεβαίωσης της στρατηγικής λήψης της νέας δειγματοληπτικής τιμής και της συνεισφοράς της στη μείωση τόσο της υδρογεωλογικής όσο και της οικονομικής αβεβαιότητας λήφθηκε υπόψη και μια δεύτερη θεωρητική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας για την προ εκ των υστέρων κατάσταση, αυτής της οποίας η θέση της εμπίπτει στη δεύτερη μεγαλύτερη τιμή της τυπικής απόκλισης (Σχήμα 8.9).



α.

β.

Σχήμα 8. 8. α. Χάρτης των τυπικών αποκλίσεων των 100 προσομοιώσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των προτέρων κατάσταση και β. χάρτης με τη θέση της μέγιστης τιμής της τυπικής απόκλισης

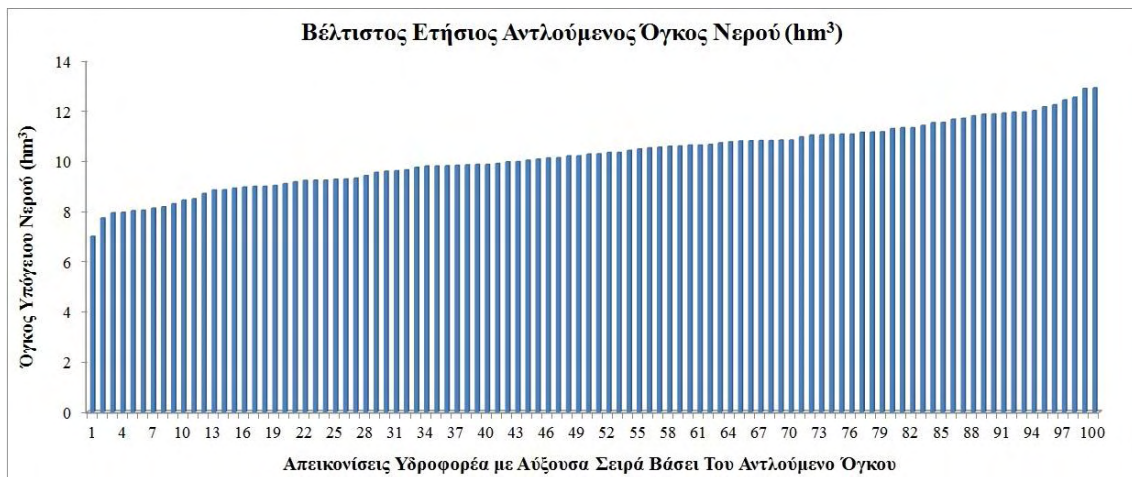


Σχήμα 8. 9. Θέσεις των δύο θεωρητικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας της προ εκ των υστέρων κατάστασης

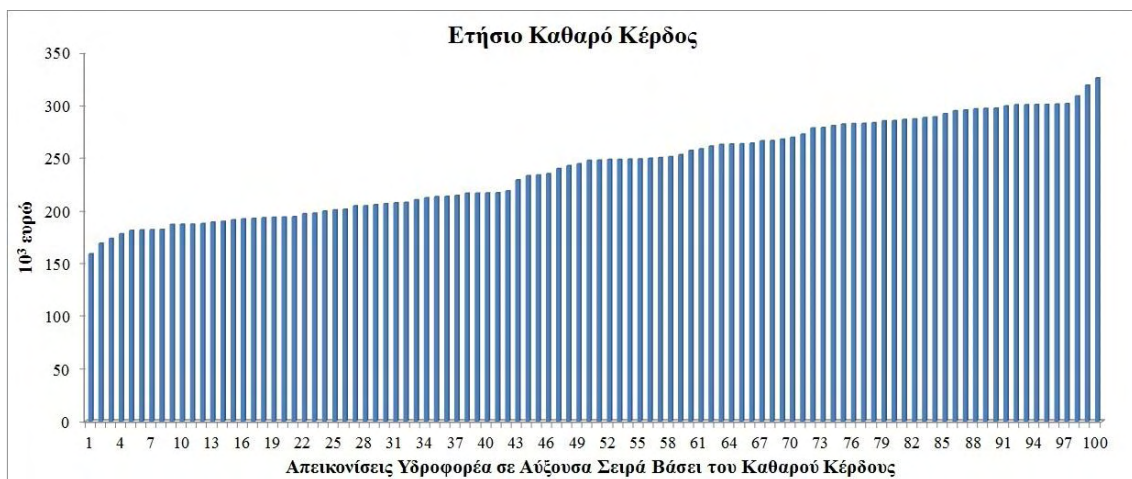
Η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας στη θέση με τη μέγιστη τυπική απόκλιση είναι $4.744 \cdot 10^{-6}$ m/s, ενώ στη θέση με τη δεύτερη μεγαλύτερη τιμή της τυπικής απόκλισης είναι $4.577 \cdot 10^{-6}$ m/s, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.9.

8.3.1. Θεωρητική τιμή#1

Κρατώντας το ίδιο ημιβαριόγραμμα της εκ των προτέρων κατάστασης, όπως αυτό περιγράφεται από την εξ. 7.9 πραγματοποιήθηκε η στοχαστική προσομοίωση της υδραυλικής αγωγιμότητας από το GSLIB με τη χρήση της SGSIM, η οποία όμως είναι εξαρτημένη και στη νέα τιμή αυτής. Οι 100 χάρτες που παρήχθησαν, εισήχθησαν στο μοντέλο της υπόγειας ροής και προέκυψαν οι 100 απεικονίσεις του υπόγειου υδροφορέα για τη διαχειριστική περίοδο 2012-2044. Πρέπει να σημειωθεί εδώ πως καμία άλλη αλλαγή δεν εισέρχεται στο μοντέλο υπόγειας ροής, πόσο μάλλον στα υπόλοιπα μοντέλα του συστήματος προσομοίωσης. Έπειτα, εφαρμόζεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης των εξ. 8.1-8.3 και προκύπτουν τόσο οι βέλτιστες θέσεις και παροχές των γεωτρήσεων όσο και το καθαρό κέρδος για κάθε απεικόνιση.



Σχήμα 8. 10. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #1

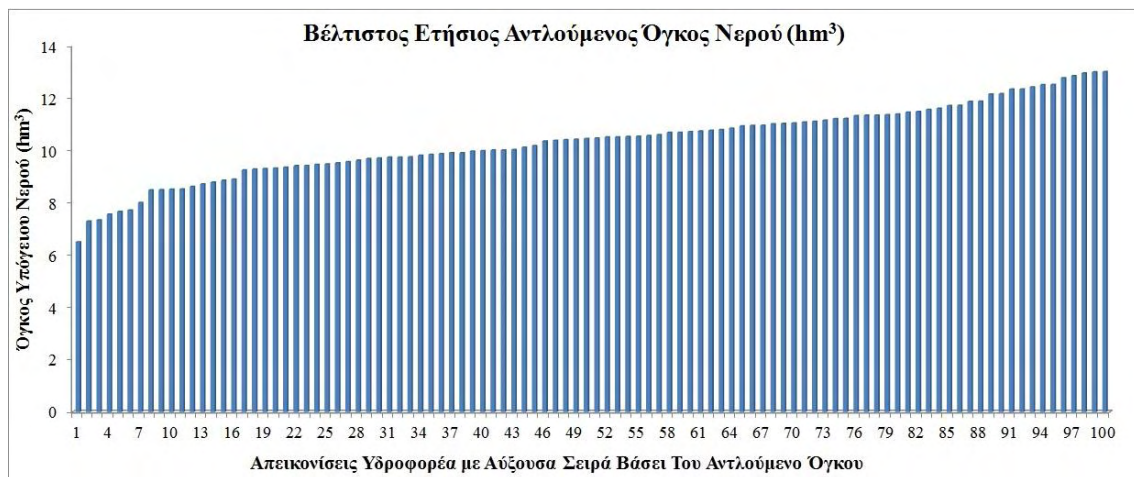


Σχήμα 8. 11. Διάγραμμα ετήσιου καθαρού κέρδους για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #1

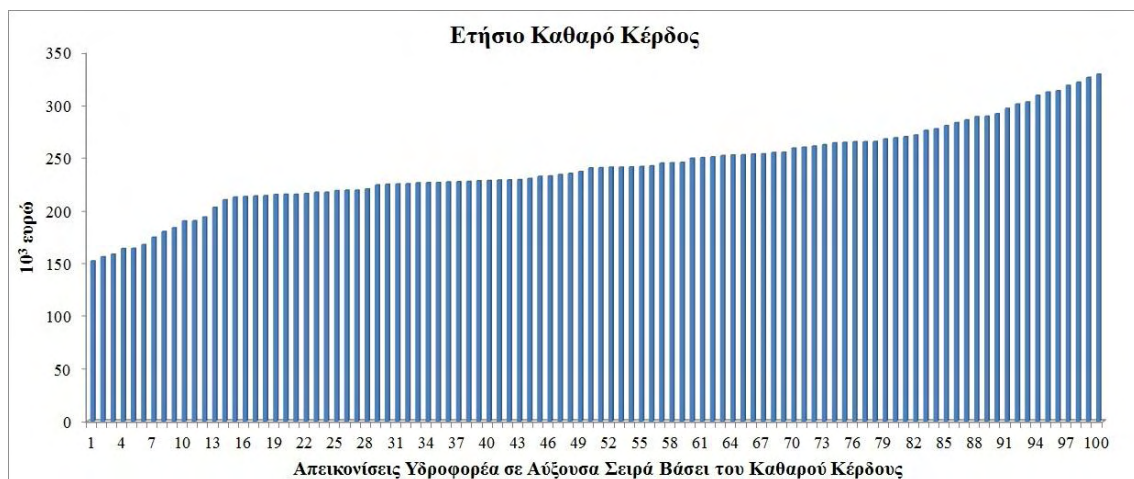
Ο ελάχιστος ετήσιος βέλτιστος όγκος είναι 6.98 hm^3 και ο μέγιστος 12.89 hm^3 με τη διαφορά τους να είναι 5.9 hm^3 . Το ελάχιστο ετήσιο καθαρό κέρδος είναι 158733 ευρώ και το μέγιστο είναι 325494 ευρώ με τη διαφορά του να είναι 166761 ευρώ. Ήδη, φαίνεται πως ακόμη και η λήψη της θεωρητικής τιμής συνεισφέρει θετικά στη μείωση της οικονομικής αβεβαιότητας (από 210417 ευρώ σε 166761 ευρώ). Η αξία της πληροφορίας της θεωρητικής τιμής #1 ισούται με τη διαφορά των δύο άνω οικονομικών αβεβαιοτήτων δηλαδή ίση με 43656 ευρώ. Αυτό οδηγεί στον διαχειριστή να επενδύσει χρήματα για λήψη της πραγματικής τιμής από το πεδίο, μιας και $VMI_{Pre\#1} > 37500$ ευρώ.

8.3.2. Θεωρητική τιμή#1'

Για τη δεύτερη υποψήφια θεωρητική τιμή της παραμέτρου ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία όπως της προηγούμενης και τα τελικά αποτελέσματα είναι πάλι οι βέλτιστες θέσεις και παροχές των γεωτρήσεων και το καθαρό κέρδος για κάθε απεικόνιση.



Σχήμα 8. 12. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #1’

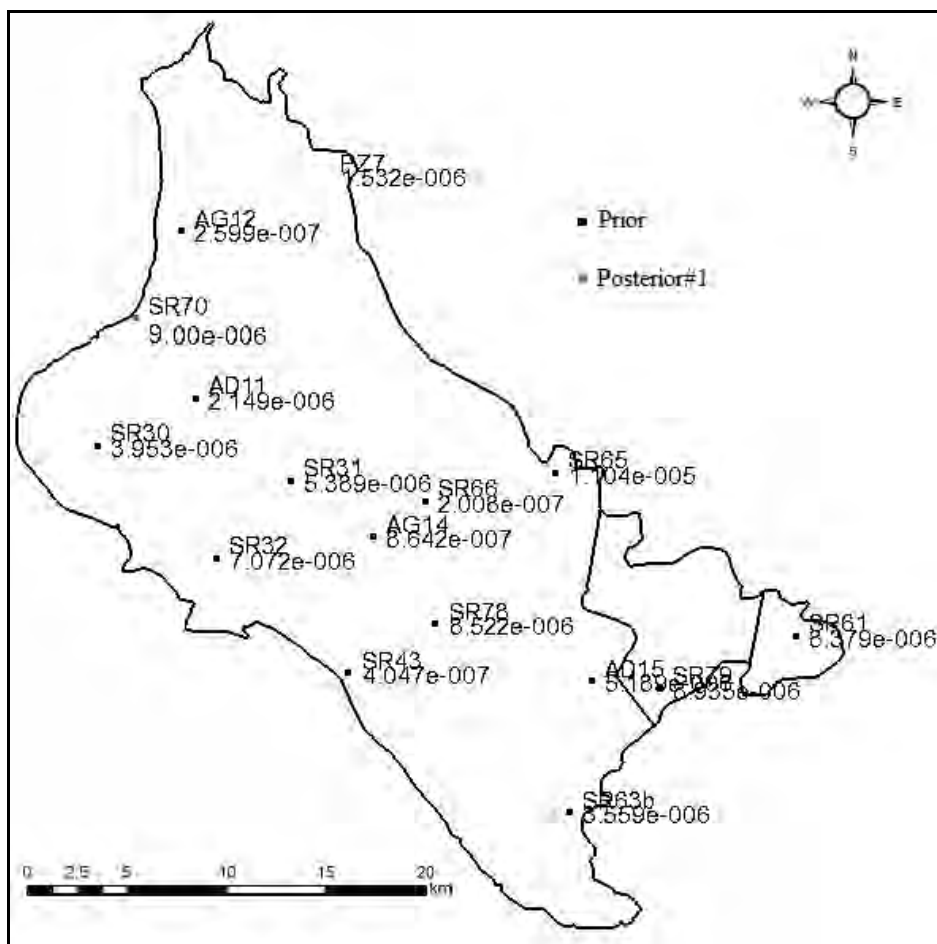


Σχήμα 8. 13. Διάγραμμα ετήσιου καθαρού κέρδους για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #1’

Ο ελάχιστος ετήσιος βέλτιστος όγκος είναι 6.49 hm^3 και ο μέγιστος 12.99 hm^3 με τη διαφορά τους να είναι 6.5 hm^3 . Το ελάχιστο ετήσιο καθαρό κέρδος είναι 151876 ευρώ και το μέγιστο είναι 329033 ευρώ με τη διαφορά του να είναι 177157 ευρώ. Όμως, η διαφορά αυτή είναι μεγαλύτερη της προ εκ των υστέρων κατάστασης #1, η οποία είναι 166761 ευρώ. Επιπλέον, η αξία της πληροφορίας της θεωρητικής #1’ είναι 33260 ευρώ και άρα μικρότερη από αυτή της θεωρητικής τιμής #1. Φαίνεται καθαρά πως η λήψη της νέας δειγματοληπτικής τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας από τη θέση με τη μέγιστη τιμή της τυπικής απόκλισης έχει τη μεγαλύτερη αξία πληροφορίας από οποιαδήποτε άλλη τιμή αυτής σε άλλη θέση. Επομένως στην εκ των υστέρων κατάσταση η νέα τιμή θα προέλθει από τη θέση εκείνη στην οποία η τυπική απόκλιση έχει τη μέγιστή της τιμή στο πεδίο και αυτό θα τηρηθεί για όλη τη στρατηγική λήψης νέας πληροφορίας.

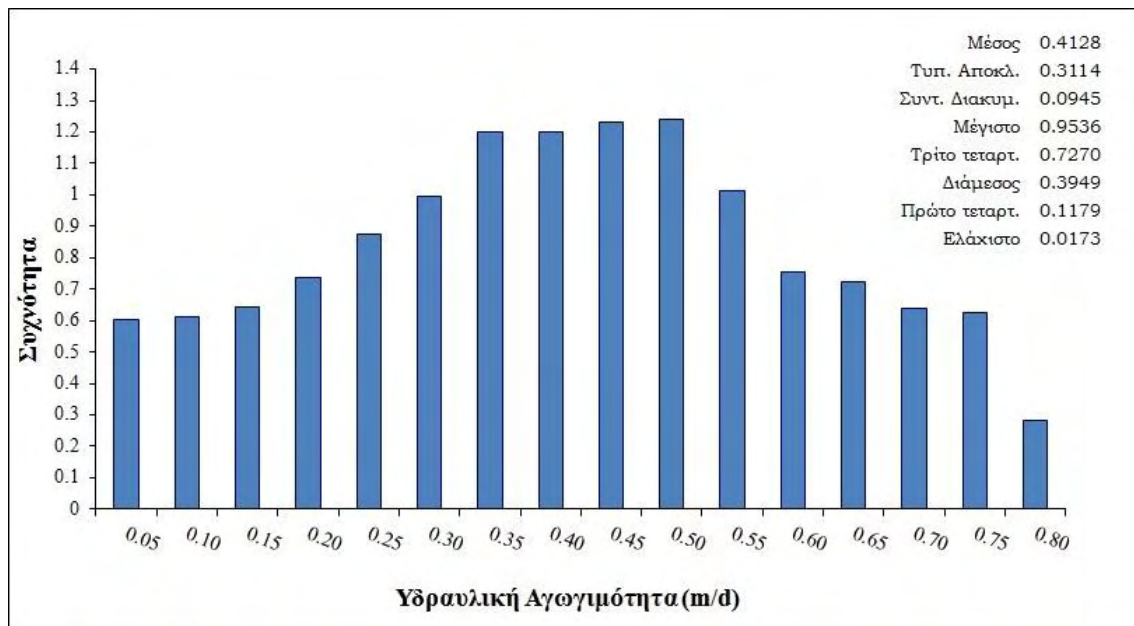
8.4. Εκ των υστέρων κατάσταση#1

Η νέα πραγματική δειγματοληπτική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας προέρχεται από την ερευνητική γεώτρηση SR70 και έχει τιμή $9 \cdot 10^{-6}$ m/s, όπως φαίνεται στον χάρτη του Σχήματος 8.14.

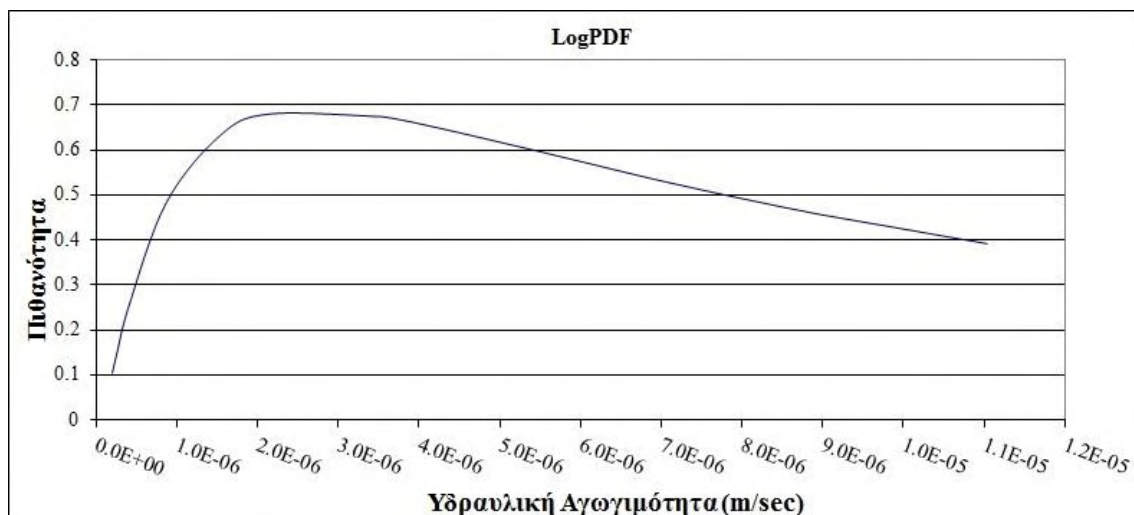


Σχήμα 8. 14. Η θέση της νέας δειγματοληπτικής τιμής τη υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#1

Σε αυτή τη φάση εφαρμόζεται ξανά η γεωστατιστική προσέγγιση μέσω του GSLIB. Πλέον αλλάζει το πεδίο τιμών της K και τα χαρακτηριστικά των 16 δειγματοληπτικών τιμών παρουσιάζονται μέσω του ιστογράμματος συχνότητας (Σχήμα 8.15) και της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των λογαριθμικών τιμών της (Σχήμα 8.16) μιας και για την παραγωγή του ημιοβαριογράμματος το πεδίο σε πρώτη φάση θεωρείται λογαριθμικό και στάσιμο με μέση τιμή $m_{\log k} = -5.572$ (-0.676 για m/d) και τυπική απόκλιση $\sigma_{\log k}^2 = 0.578$ και σε δεύτερη φάση λογοκανονικό για να ικανοποιηθεί η απαίτηση της κανονικοποίησης των τιμών για την SGSIM.



Σχήμα 8. 15. Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης των δειγματοληπτικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας σε m/d για την εκ των υστέρων κατάσταση#1

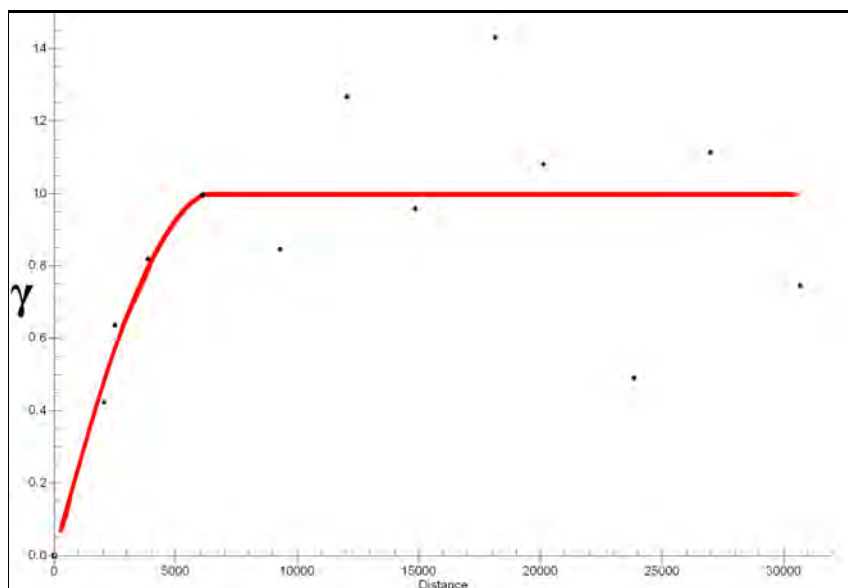


Σχήμα 8. 16. Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των λογαριθμικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#1

Το πειραματικό ημιβαριόγραμμα που προέκυψε προσεγγίστηκε από το μοντέλο/θεωρητικό του πρώτου μέσω μιας σφαιρικής συνάρτησης ως εξής:

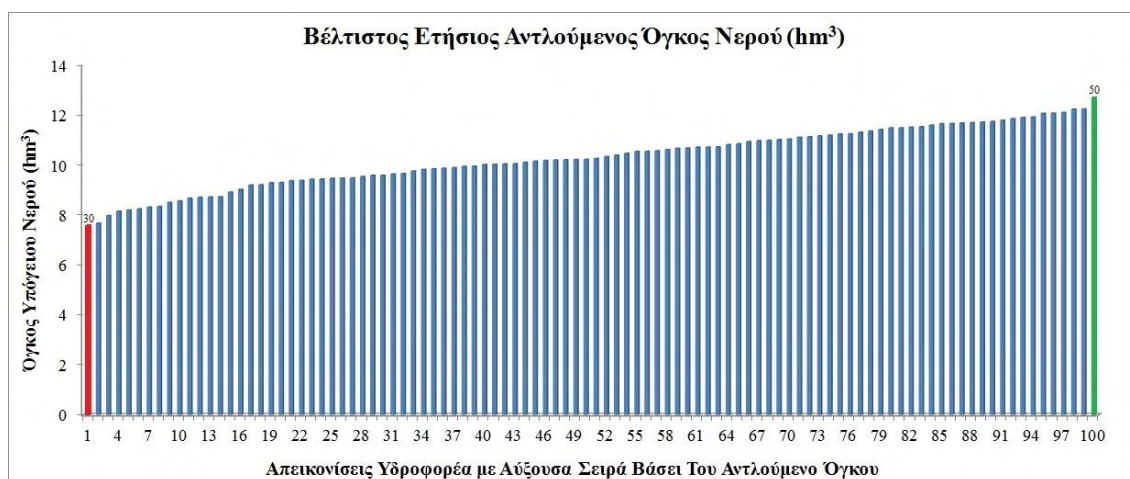
$$\gamma(h) = \begin{cases} 1 * \left[1.5 * \frac{h}{6200} - 0.5 * \left(\frac{h}{6200} \right)^3 \right], & \text{όταν } h \leq 6200 \text{ m} \\ 1, & \text{όταν } h \geq 6200 \text{ m} \end{cases} \quad (\text{Εξ. 8.5})$$

με τη χρήση του αλγορίθμου VMODEL. Τόσο το πειραματικό (μαύρες τελείες) όσο και το θεωρητικό (κόκκινη γραμμή) ημιβαριόγραμμα παρουσιάζονται στο γράφημα του σχήματος 8.17.

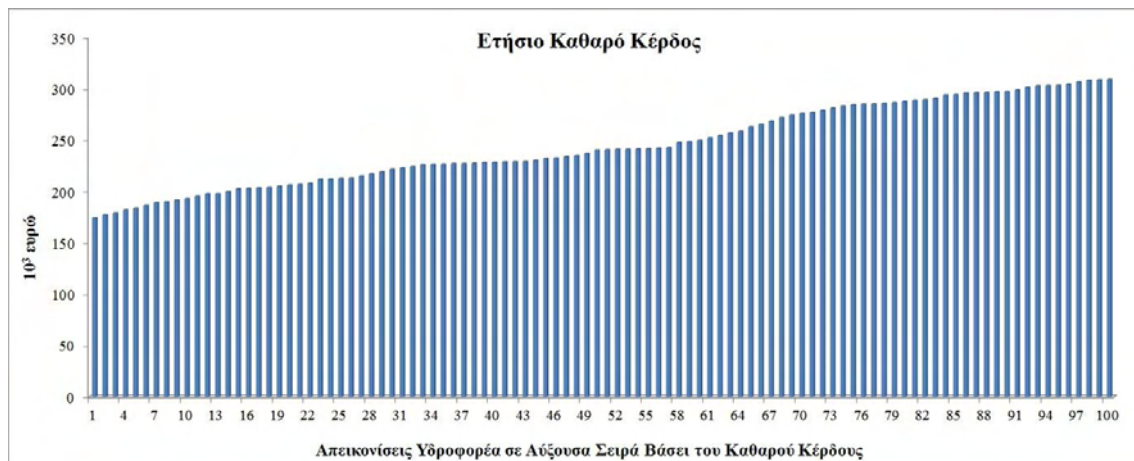


Σχήμα 8. 17. Πειραματικό και θεωρητικό ημιβαριόγραμμα της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#1

Οι 100 εξαρτημένες πραγματώσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας εισήχθησαν στο μοντέλο υπόγειας ροής και έδωσε με τη σειρά του τις 100 απεικονίσεις του υδροφορέα, πάνω στις οποίες λύθηκε το πρόβλημα της βελτιστοποίησης των εξισώσεων 8.1-8.3 και προέκυψαν οι βέλτιστες θέσεις και παροχές των γεωτρήσεων και το καθαρό κέρδος για κάθε απεικόνιση.

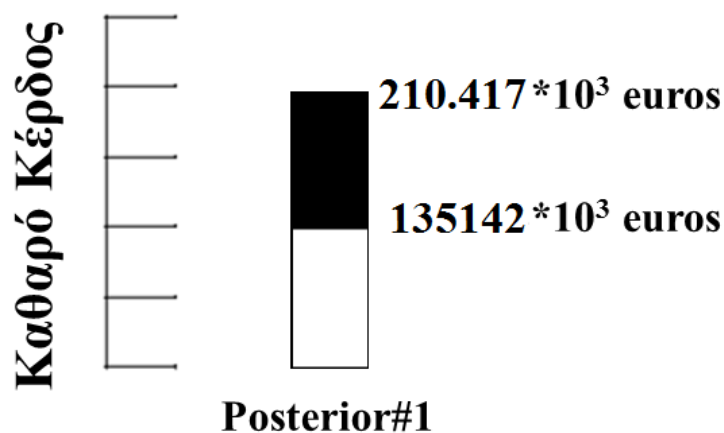


Σχήμα 8. 18. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα της εκ των υστέρων κατάστασης#1



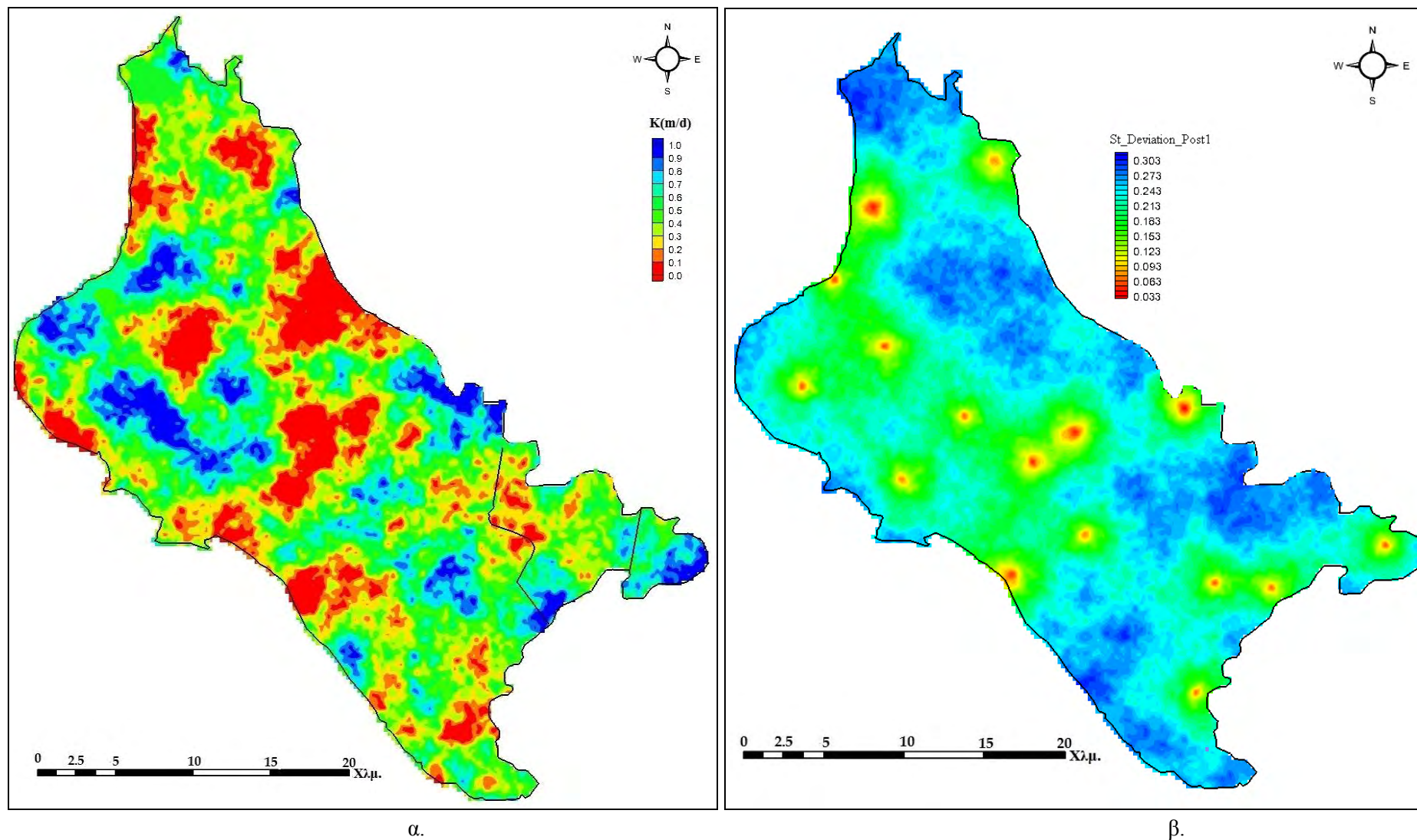
Σχήμα 8. 19. Διάγραμμα ετήσιου καθαρού κέρδους για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα της εκ των υστέρων κατάστασης#1

Ο ελάχιστος ετήσιος βέλτιστος όγκος είναι 7.561 hm^3 και ο μέγιστος 12.648 hm^3 με τη διαφορά τους να είναι 5.087 hm^3 . Το ελάχιστο ετήσιο καθαρό κέρδος είναι 174032 ευρώ και το μέγιστο είναι 309174 ευρώ με τη διαφορά του να είναι 135142 ευρώ. Επιπλέον μειώθηκε και το εύρος των γεωτρήσεων άντλησης το οποίο είναι από 30 έως 50 πηγάδια, η θέση των οποίων φαίνεται στο Σχήμα 8.22. Με βάση λοιπόν το σχεδιάγραμμα του Wagner (1999), η αξία της μέτρησης αυτής είναι $VMI = 75275$ ευρώ, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 8. 20. Αξία της πληροφορίας για την πρώτη δειγματοληπτική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας

Η αξία της πραγματικής τιμής από αυτή της θεωρητικής είναι μεγαλύτερη. Όμως επειδή $VMI_{Post\#1} > 37500$ ευρώ, τότε συμφέρει τον διαχειριστή η λήψη και νέας τιμής από το πεδίο. Για το λόγο αυτό, θα ληφθεί αρχικά η θεωρητική τιμή της παραμέτρου για την προ εκ των υστέρων κατάσταση#2. Η τιμή θα παρθεί από τον χάρτη των μέσων τιμών της παραμέτρου, στη θέση με τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση όπως αυτή προέκυψε από την εκ των υστέρων κατάσταση#1. Ο χάρτης των μέσων τιμών και της τυπικής απόκλισης παρουσιάζονται παρακάτω.

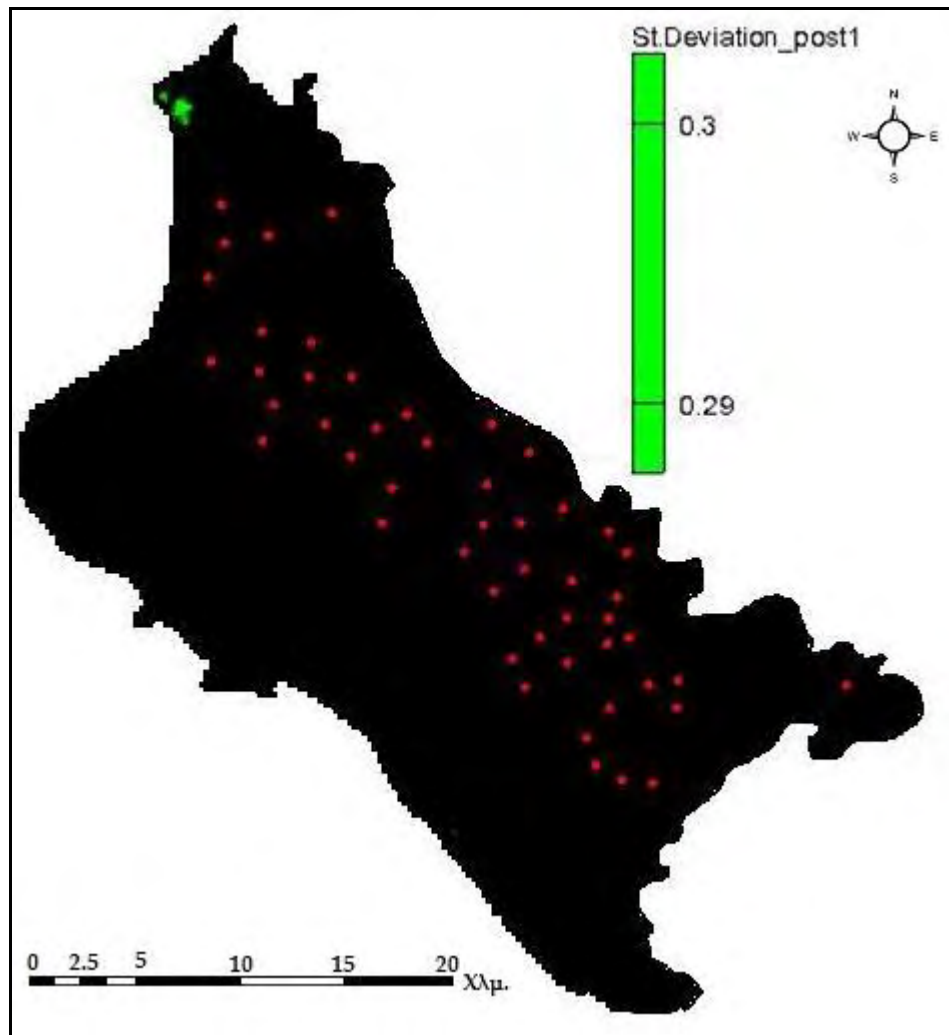


α. β.
Σχήμα 8. 21. Χάρτης της α. μέσης τιμής και β. της τοπικής απόκλισης των 100 εξαρτημένων πραγματώσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#1

Με την εξάρτηση των στοχαστικών προσομοιώσεων στη νέα τιμή της παραμέτρου, αμέσως η τιμή της τυπικής απόκλισης - και επομένως η υδρογεωλογική αβεβαιότητα - έγινε μηδενική στη θέση της νέας τιμής και μειώθηκε στην περιοχή γύρω από αυτήν.

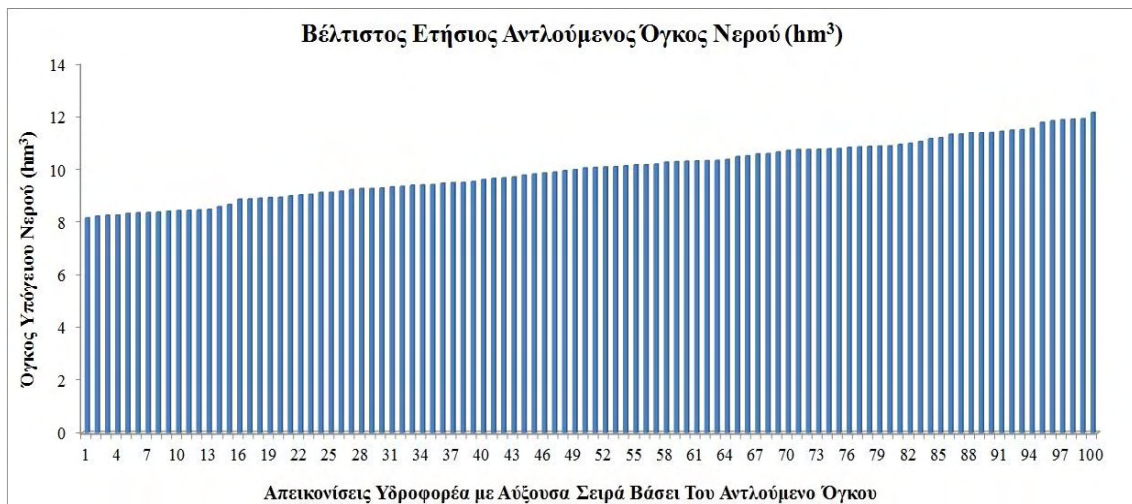
8.5. Προ εκ των υστέρων κατάσταση#2

Στον χάρτη του Σχήματος 8.22 φαίνεται η θέση της μέγιστης τυπικής απόκλισης (πράσινο χρώμα) του Σχήματος 8.21.β. και οι θέσεις των γεωτρήσεων άντλησης (κόκκινες βούλες).



Σχήμα 8. 22. Θέση της μέγιστης τιμής της τυπικής απόκλισης της υδραυλικής αγωγιμότητας και θέσεις των γεωτρήσεων άντλησης για την εκ των υστέρων κατάσταση#1

Η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας σε αυτήν τη θέση προκύπτει από τον χάρτη 8.21.α και είναι ίση με $4.807 \cdot 10^{-6}$ m/s. Τηρώντας το ίδιο ημιβαριόγραμμα (εξ. 8.5) εκτελείται η SGSIM εξαρτημένη στη θέση αυτή, παράγοντας 100 πραγματώσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας. Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία και προκύπτουν οι βέλτιστες θέσεις και παροχές των γεωτρήσεων και το καθαρό κέρδος για κάθε απεικόνιση για τη διαχειριστική περίοδο.



Σχήμα 8. 23. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #2



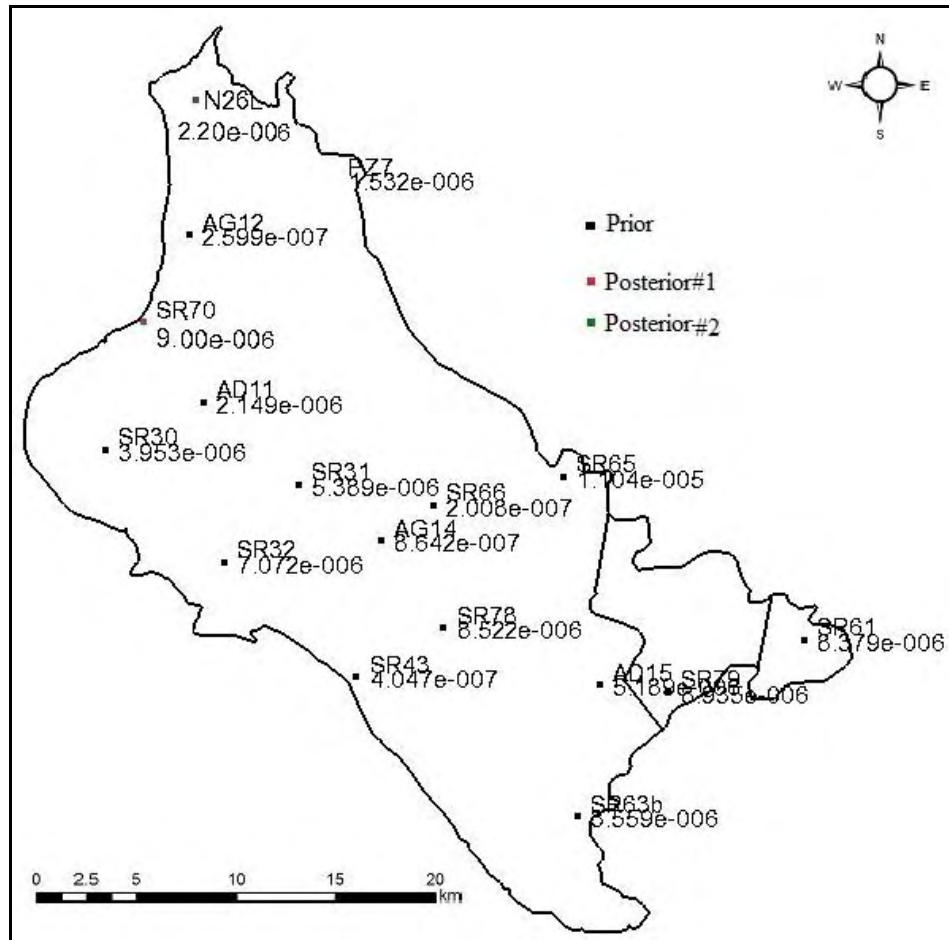
Σχήμα 8. 24. Διάγραμμα ετήσιου καθαρού κέρδους για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #2

Ο ελάχιστος ετήσιος βέλτιστος όγκος είναι 8.137 hm^3 και ο μέγιστος 12.123 hm^3 με τη διαφορά τους να είναι 3.986 hm^3 . Το ελάχιστο ετήσιο καθαρό κέρδος είναι 178036 ευρώ και το μέγιστο είναι 274593 ευρώ με τη διαφορά του να είναι 96557 ευρώ. Η αξία της πληροφορίας της θεωρητικής τιμής #2 ισούται με τη διαφορά της οικονομικής αβεβαιότητας της εκ των υστέρων κατάστασης #1 με αυτής της προ εκ των υστέρων κατάστασης #2 και είναι 38585 ευρώ. Επειδή $VMI_{Pre\#2} > 37500$ ευρώ, αξίζει να ληφθεί και η πραγματική τιμή από το πεδίο.

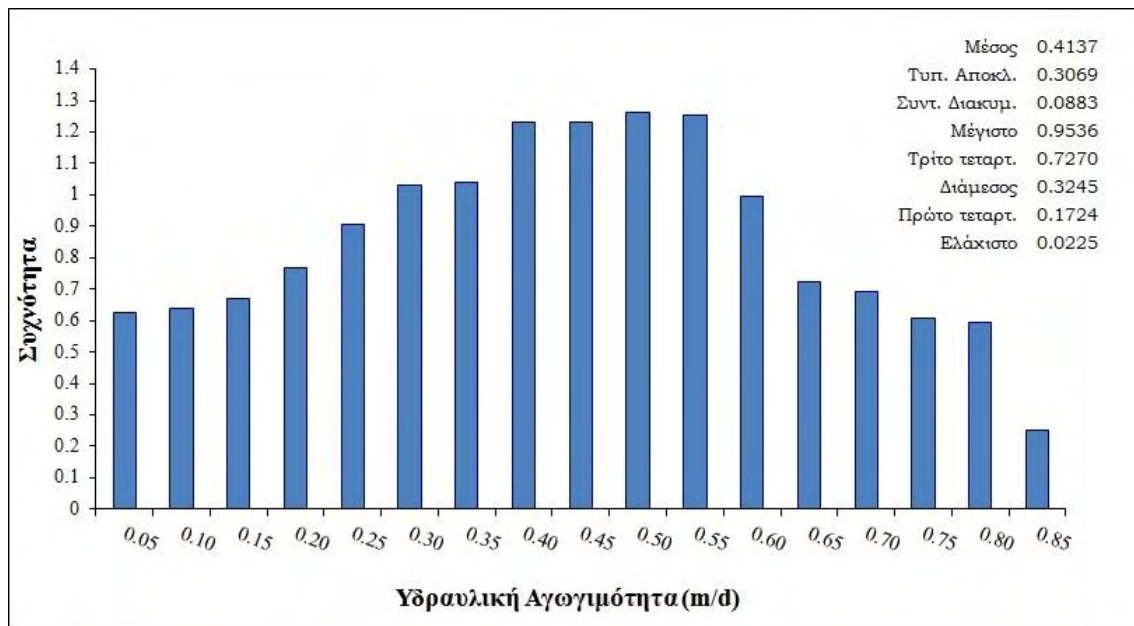
8.6. Εκ των υστέρων κατάσταση#2

Η πραγματική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας που λήφθηκε από την ερευνητική γεώτρηση N26L είναι $2.2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ (Σχήμα 8.25). Σε αυτήν τη φάση εφαρμόζεται ξανά η γεωστατιστική προσέγγιση μέσω του GSLIB. Πλέον αλλάζει το πεδίο τιμών της K και τα χαρακτηριστικά των 17 δειγματοληπτικών τιμών παρουσιάζονται μέσω του ιστογράμματος συχνότητας (Σχήμα 8.26) και της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας

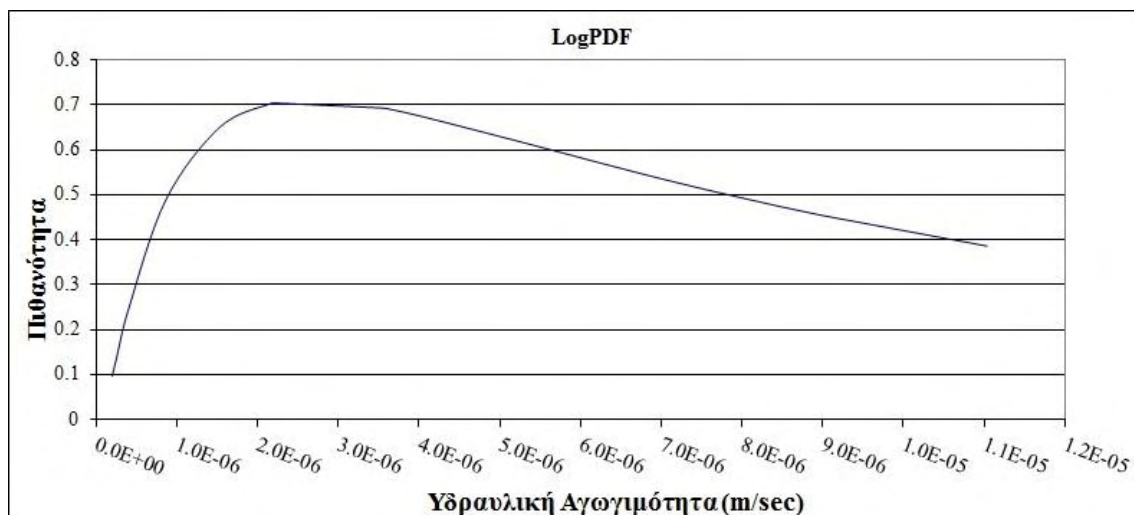
των λογαριθμικών τιμών της (Σχήμα 8.27), μιας και για την παραγωγή του ημιβαριογράμματος το πεδίο σε πρώτη φάση θεωρείται λογαριθμικό και στάσιμο με μέση τιμή $m_{\log k} = -5.577$ (-0.64 για m/d) και τυπική απόκλιση $\sigma_{\log k}^2 = 0.56$ και σε δεύτερη φάση λογοκανονικό για να ικανοποιηθεί η απαίτηση της κανονικοποίησης των τιμών για την SGSIM.



Σχήμα 8. 25. Η θέση της νέας δειγματοληπτικής τιμής τη υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#2



Σχήμα 8. 26. Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης των δειγματοληπτικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας σε m/d για την εκ των υστέρων κατάσταση#2

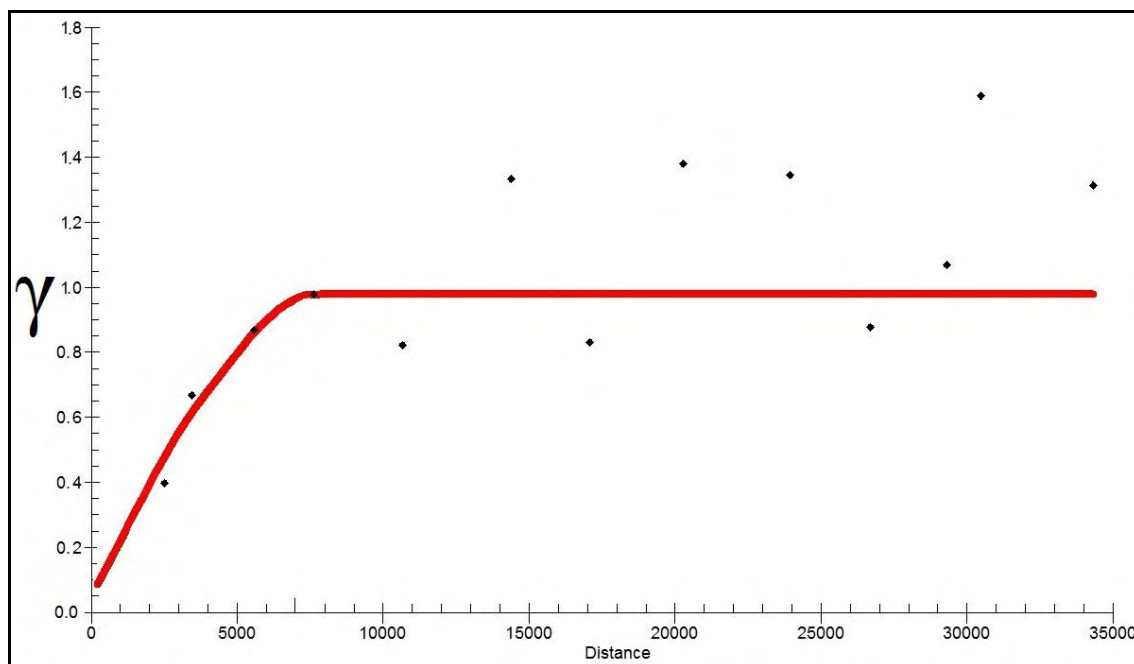


Σχήμα 8. 27. Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των λογαριθμικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#2

Το πειραματικό ημιβαριόγραμμα που προέκυψε προσεγγίστηκε από το μοντέλο/θεωρητικό αυτού μέσω μιας σφαιρικής συνάρτησης ως εξής:

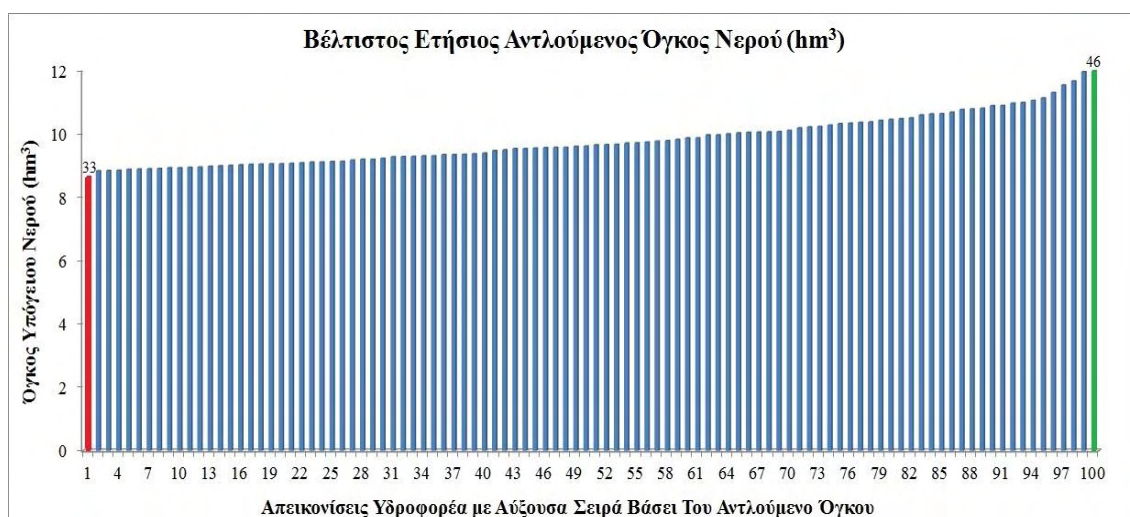
$$\gamma(h) = \begin{cases} 1 * \left[1.5 * \frac{h}{7600} - 0.5 * \left(\frac{h}{7600} \right)^3 \right], & \text{όταν } h \leq 7600 \text{ m} \\ 1, & \text{, όταν } h \geq 7600 \text{ m} \end{cases} \quad (\text{Εξ. 8.6})$$

με τη χρήση του αλγορίθμου VMODEL. Τόσο το πειραματικό (μαύρες τελείες) όσο και το θεωρητικό (κόκκινη γραμμή) ημιβαριόγραμμα παρουσιάζονται στο γράφημα του Σχήματος 8.28.

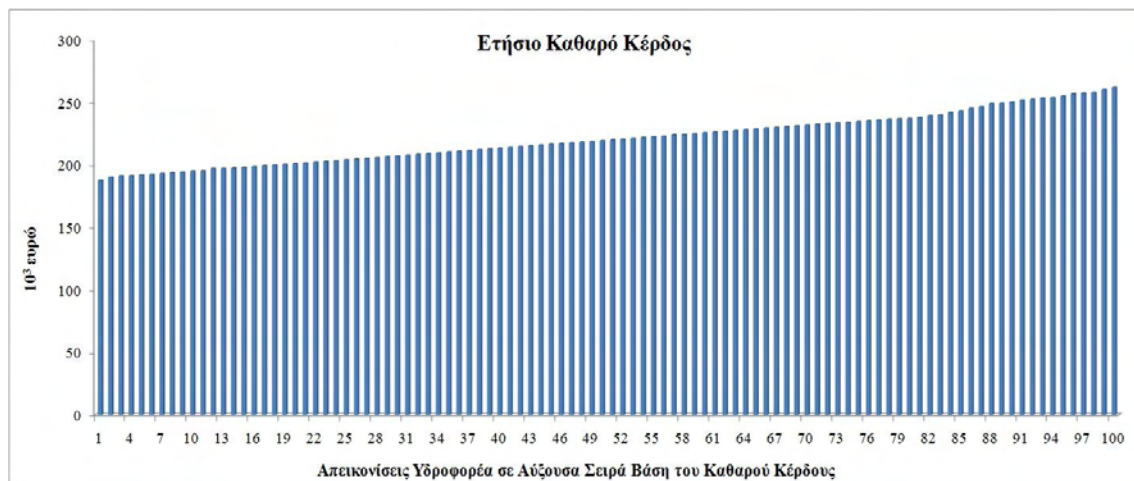


Σχήμα 8. 28. Πειραματικό και θεωρητικό ημιβαριόγραμμα της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#2

Οι 100 εξαρτημένες πραγματώσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας εισήχθησαν στο μοντέλο υπόγειας ροής και έδωσε με τη σειρά του τις 100 απεικονίσεις του υδροφορέα, πάνω στις οποίες λύθηκε το πρόβλημα της βελτιστοποίησης των εξισώσεων 8.1-8.3 και προέκυψαν οι βέλτιστες θέσεις και παροχές των γεωτρήσεων και το καθαρό κέρδος για κάθε απεικόνιση.

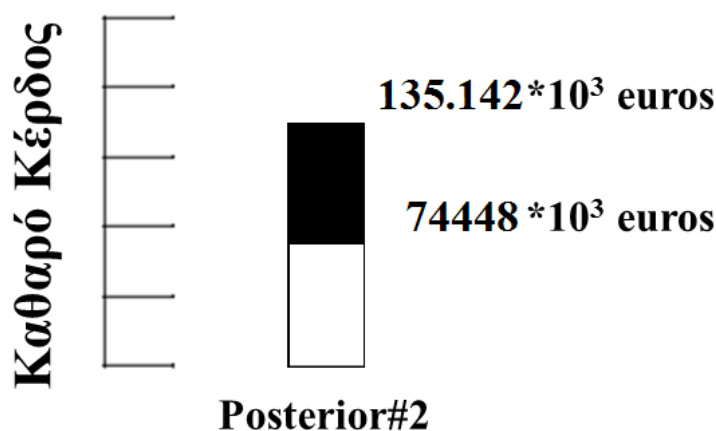


Σχήμα 8. 29. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα της εκ των υστέρων κατάστασης #2



Σχήμα 8. 30. Διάγραμμα ετήσιου καθαρού κέρδους για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα της εκ των υστέρων κατάστασης #2

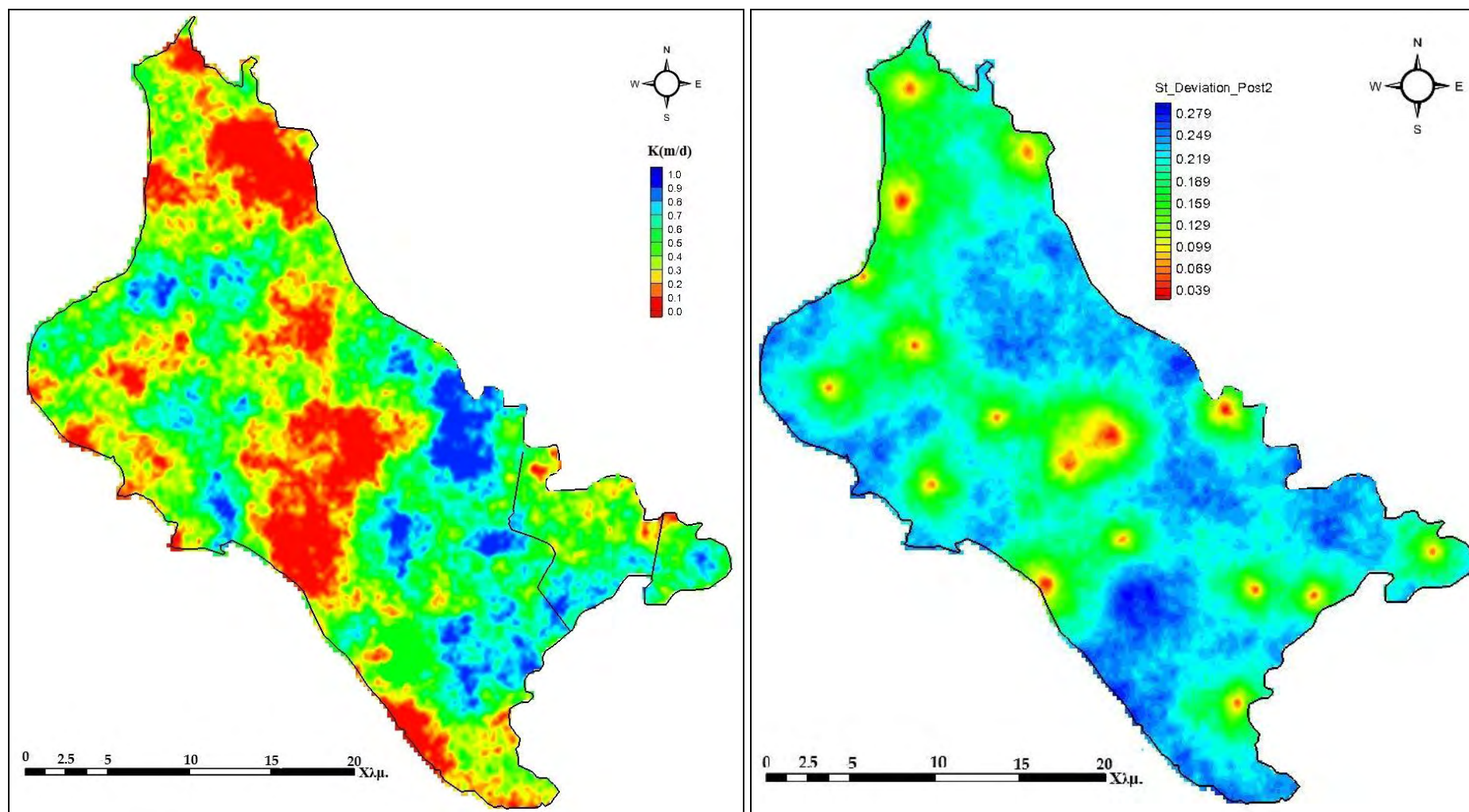
Ο ελάχιστος ετήσιος βέλτιστος όγκος είναι 8.618 hm^3 και ο μέγιστος 11.951 hm^3 με τη διαφορά τους να είναι 3.333 hm^3 . Το ελάχιστο ετήσιο καθαρό κέρδος είναι 187608 ευρώ και το μέγιστο είναι 262056 ευρώ με τη διαφορά του να είναι 74448 ευρώ. Επιπλέον, μειώθηκε και το εύρος των γεωτρήσεων άντλησης το οποίο είναι από 33 έως 46 πηγάδια, η θέση των οποίων φαίνεται στο Σχήμα 8.33. Με βάση λοιπόν το σχεδιάγραμμα του Wagner (1999), η αξία της μέτρησης αυτής είναι $\text{VMI} = 60694$ ευρώ, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 8. 31. Αξία της πληροφορίας για τη δεύτερη δειγματοληπτική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας

Η αξία της πραγματικής τιμής από αυτή της θεωρητικής είναι μεγαλύτερη μιας και η οικονομική αβεβαιότητα μετά τη λήψη της δεύτερης μειώθηκε κατά 60694 ευρώ. Όμως επειδή $\text{VMI}_{\text{Post}\#2} > 37500$ ευρώ τότε συμφέρει τον διαχειριστή η λήψη και νέας τιμής από το πεδίο. Για τον λόγο αυτό, θα ληφθεί αρχικά η θεωρητική τιμή της παραμέτρου για την προ εκ των υστέρων κατάσταση#3. Η τιμή θα παρθεί από τον χάρτη των μέσων τιμών της παραμέτρου, στη θέση με τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση όπως αυτή προέκυψε από την εκ των υστέρων κατάσταση#2. Ο χάρτης των μέσων τιμών και της τυπικής απόκλισης παρουσιάζονται παρακάτω.

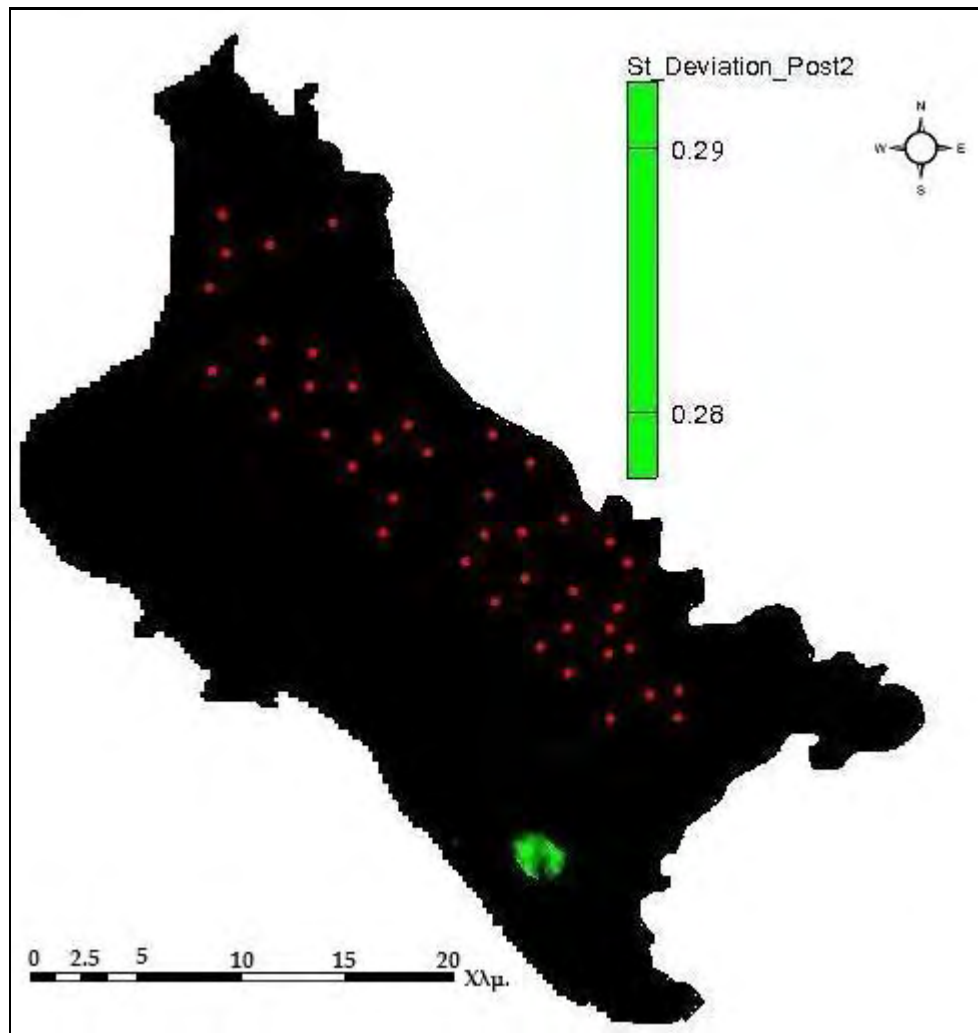
Με την εξάρτηση των στοχαστικών προσομοιώσεων στη δεύτερη τιμή της παραμέτρου, αμέσως η τιμή της τυπικής απόκλισης - και επομένως η υδρογεωλογική αβεβαιότητα - έγινε μηδενική στη θέση της νέας τιμής και μειώθηκε στην περιοχή γύρω από αυτήν. Φαίνεται ήδη από τη σύγκριση των Σχημάτων 8.8.α και 8.32.β η σημαντική μείωση των τιμών της τυπικής απόκλισης της υδραυλικής αγωγιμότητας στο πεδίο μελέτης.



Σχήμα 8. 32. Χάρτης της α. μέσης τιμής και β. της τυπικής απόκλισης των 100 εξαρτημένων πραγματώσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#2

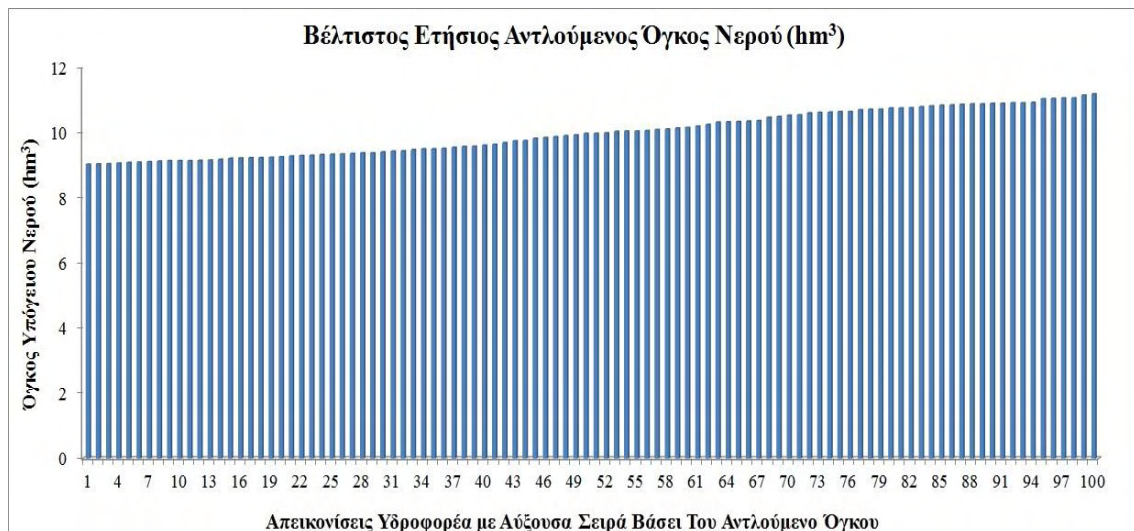
8.7. Προ εκ των υστέρων κατάσταση#3

Στον χάρτη του Σχήματος 8.33 φαίνεται η θέση της μέγιστης τυπικής απόκλισης (πράσινο χρώμα) του Σχήματος 8.32.β. και οι θέσεις των γεωτρήσεων άντλησης (κόκκινες βούλες).

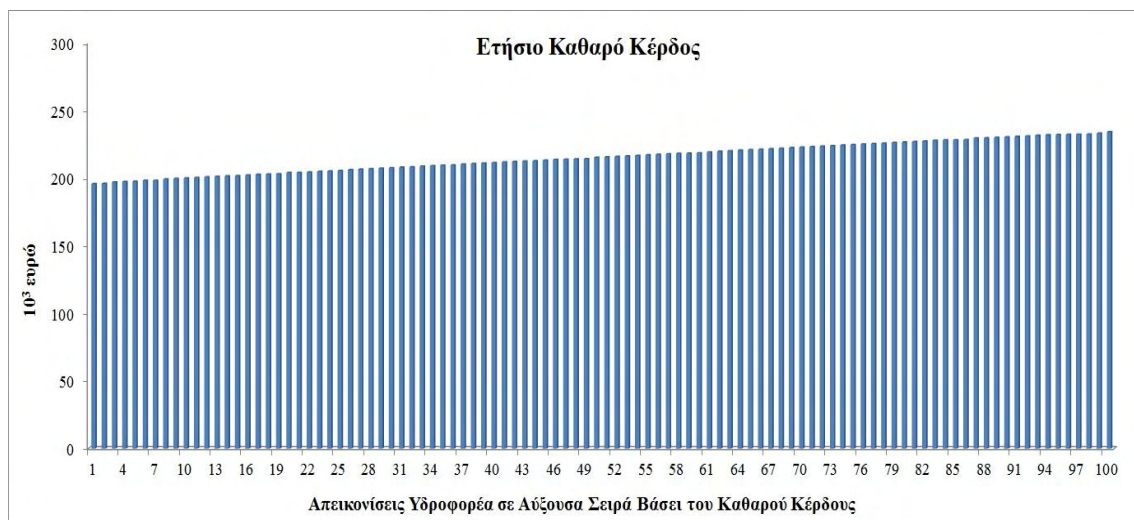


Σχήμα 8. 33. Θέση της μέγιστης τιμής της τυπικής απόκλισης της υδραυλικής αγωγιμότητας και θέσεις των γεωτρήσεων άντλησης για την εκ των υστέρων κατάσταση#2

Η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας σε αυτήν τη θέση προκύπτει από τον χάρτη 8.32.α και είναι ίση με $5.936 \cdot 10^{-6}$ m/s. Τηρώντας το ίδιο ημιβαριόγραμμα (εξ. 8.6) εκτελείται η SGSIM εξαρτημένη στη θέση αυτή, παράγοντας 100 πραγματώσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας. Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία και προκύπτουν οι βέλτιστες θέσεις και παροχές των γεωτρήσεων και το καθαρό κέρδος για κάθε απεικόνιση για τη διαχειριστική περίοδο.



Σχήμα 8. 34. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #3



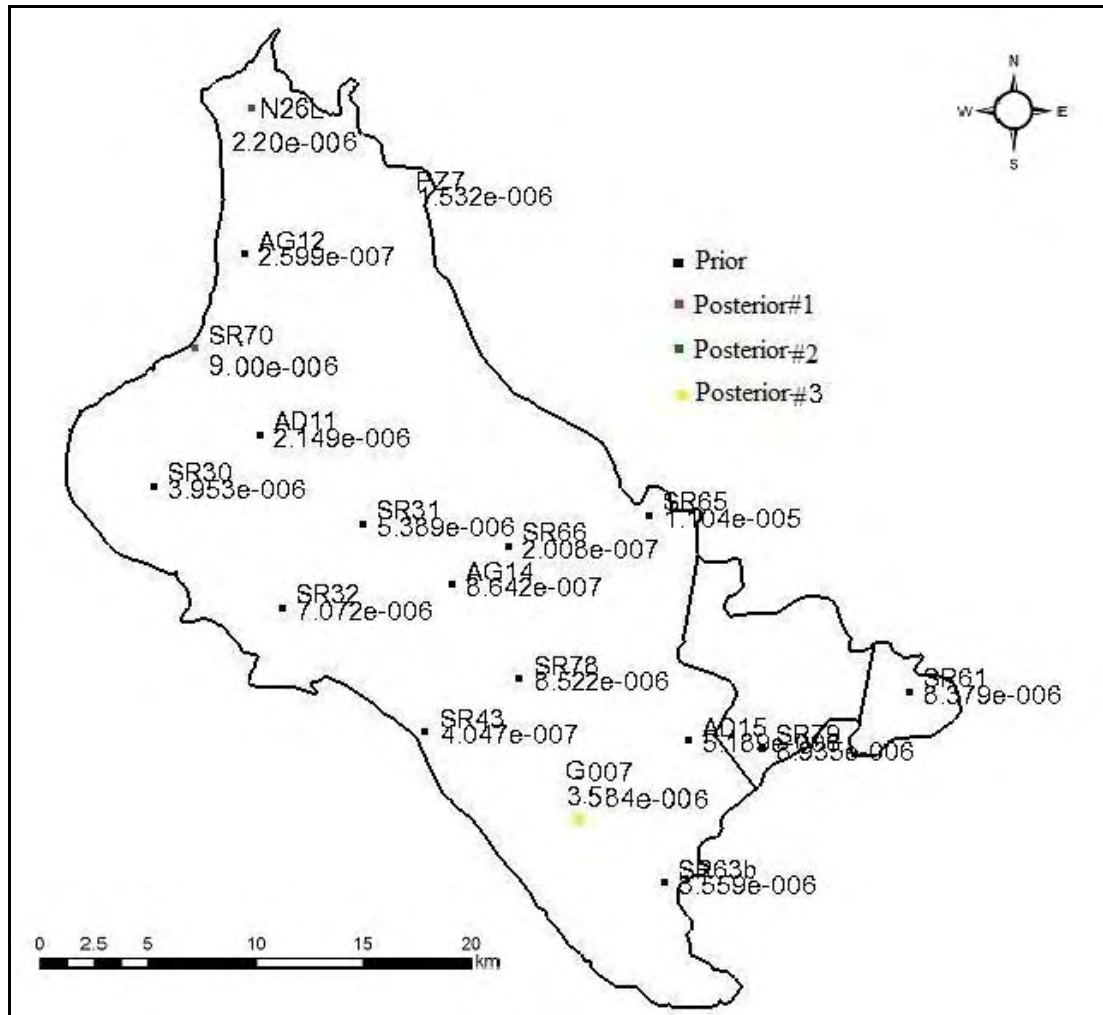
Σχήμα 8. 35. Διάγραμμα ετήσιου καθαρού κέρδους για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #3

Ο ελάχιστος ετήσιος βέλτιστος όγκος είναι 9.002 hm^3 και ο μέγιστος 11.153 hm^3 με τη διαφορά τους να είναι 2.151 hm^3 . Το ελάχιστο ετήσιο καθαρό κέρδος είναι 197673 ευρώ και το μέγιστο είναι 234095 ευρώ με τη διαφορά του να είναι 36422 ευρώ. Η αξία της πληροφoρίας της θεωρητικής τιμής #3 ισούται με τη διαφορά της οικονομικής αβεβαιότητας της εκ των υστέρων κατάστασης #2 με αυτής της προ εκ των υστέρων κατάστασης #3 και είναι 38026 ευρώ. Επειδή $VMI_{Pre\#3} > 37500$ ευρώ, αξίζει να ληφθεί και η πραγματική τιμή από το πεδίο.

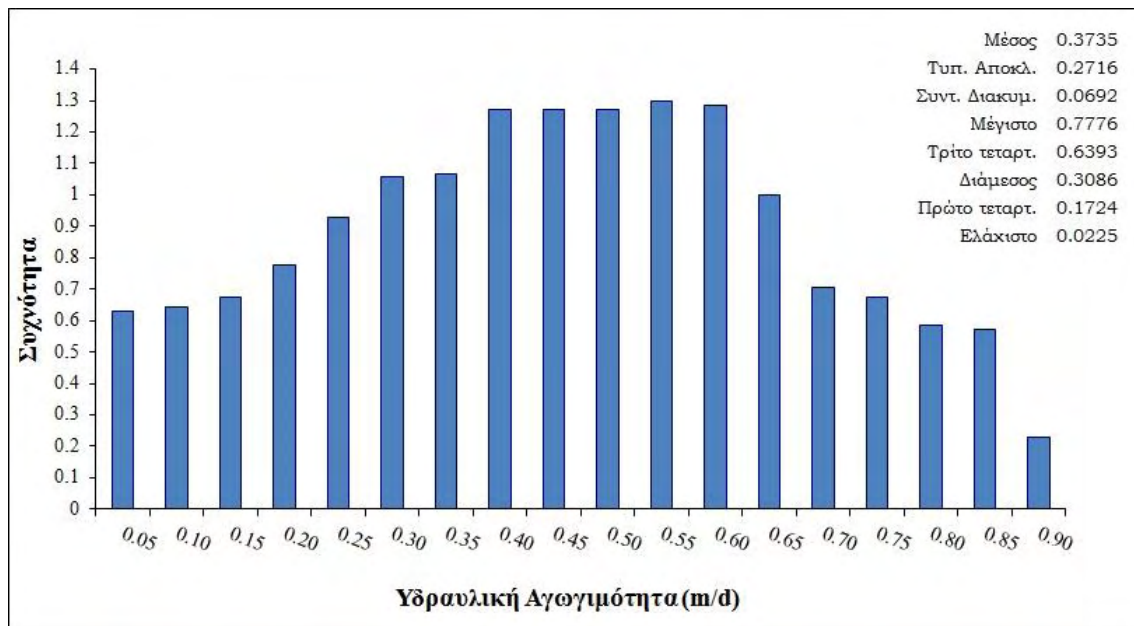
8.8. Εκ των υστέρων κατάσταση #3

Η πραγματική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας που λήφθηκε από την ερευνητική γεώτρηση G007 είναι $3.584 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ (Σχήμα 8.36). Σε αυτήν τη φάση εφαρμόζεται ξανά η γεωστατιστική προσέγγιση μέσω του GSLIB. Πλέον αλλάζει το πεδίο τιμών της K και τα χαρακτηριστικά των 18 δειγματοληπτικών τιμών παρουσιάζονται μέσω του

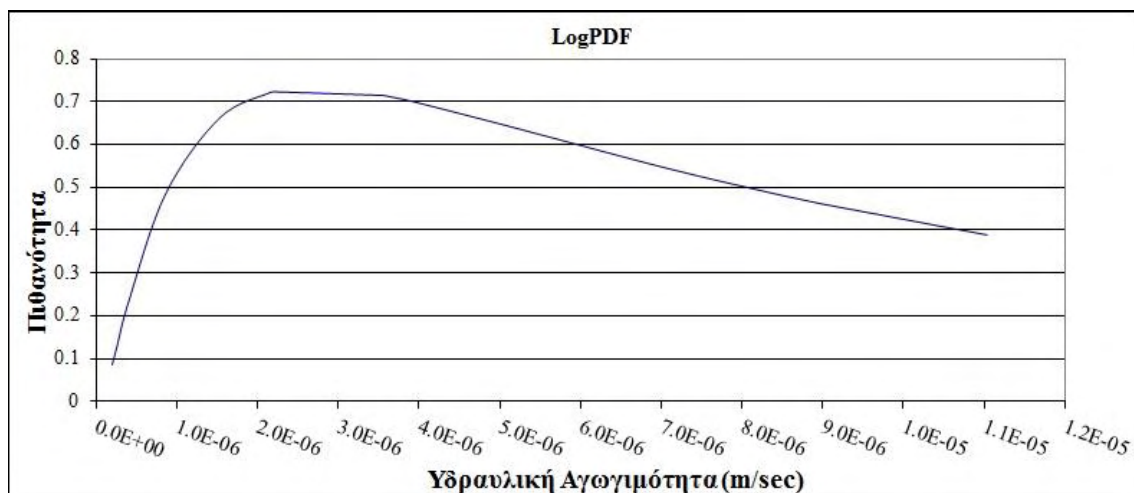
ιστογράμματος συχνότητας (Σχήμα 8.37) και της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των λογαριθμικών τιμών της (Σχήμα 8.38) μιας και για την παραγωγή του ημιβαριογράμματος το πεδίο σε πρώτη φάση θεωρείται λογαριθμικό και στάσιμο με μέση τιμή $m_{\log k} = -5.57$ (-0.67 για m/d) και τυπική απόκλιση $\sigma_{\log k}^2 = 0.544$ και σε δεύτερη φάση λογοκανονικό για να ικανοποιηθεί η απαίτηση της κανονικοποίησης των τιμών για την SGSIM.



Σχήμα 8. 36. Η θέση της νέας δειγματοληπτικής τιμής τη υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#3



Σχήμα 8. 37. Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης των δειγματοληπτικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας σε m/d για την εκ των υστέρων κατάσταση#3

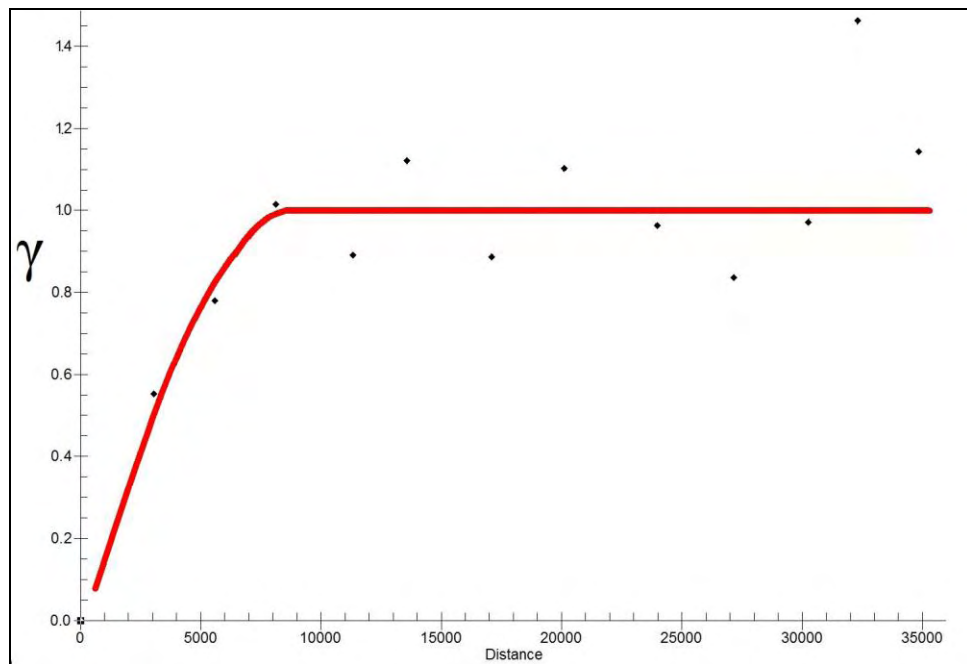


Σχήμα 8. 38. Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των λογαριθμικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#3

Το πειραματικό ημιβαριόγραμμα που προέκυψε προσεγγίστηκε από το μοντέλο/θεωρητικό αυτού μέσω μιας σφαιρικής συνάρτησης ως εξής:

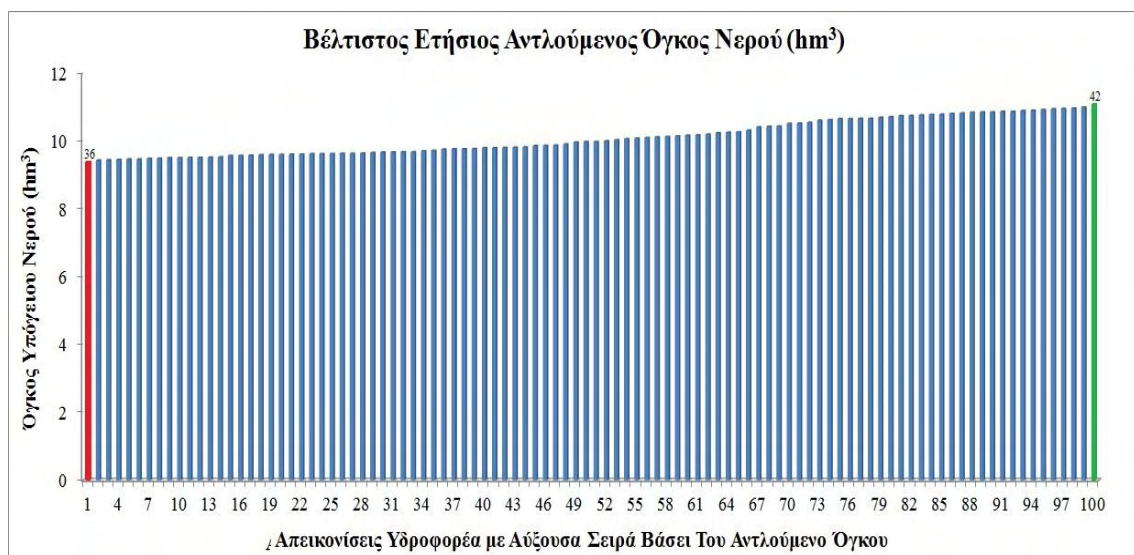
$$\gamma(h) = \begin{cases} 1 * \left[1.5 * \frac{h}{8600} - 0.5 * \left(\frac{h}{8600} \right)^3 \right], & \text{όταν } h \leq 8600 \text{ m} \\ 1 & , \text{όταν } h \geq 8600 \text{ m} \end{cases} \quad (\text{Εξ. 8.7})$$

με τη χρήση του αλγορίθμου VMODEL. Τόσο το πειραματικό (μαύρες τελείες) όσο και το θεωρητικό (κόκκινη γραμμή) ημιβαριόγραμμα παρουσιάζονται στο γράφημα του Σχήματος 8.39.

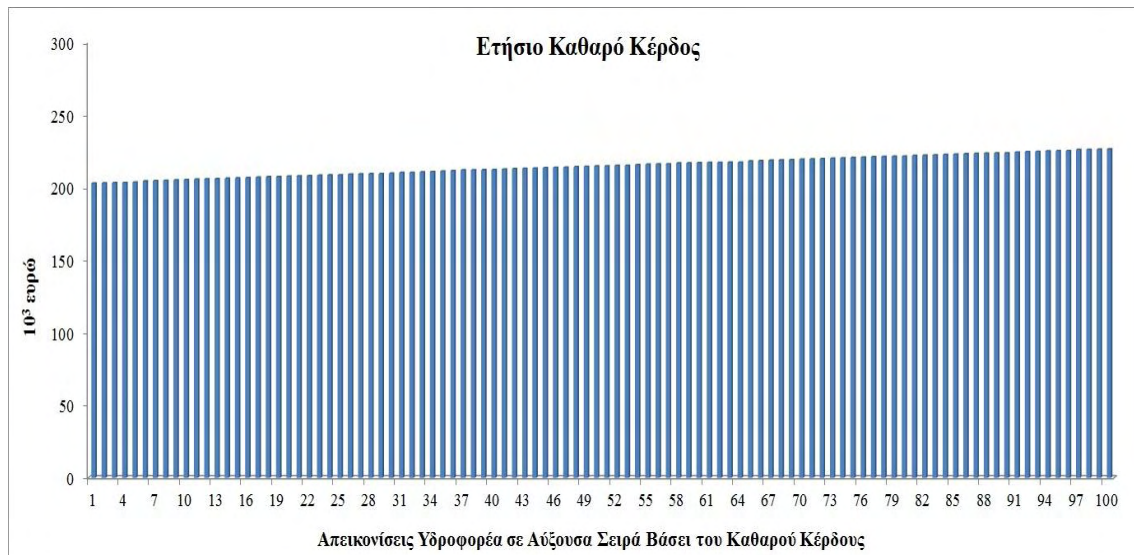


Σχήμα 8. 39. Πειραματικό και θεωρητικό ημβαριόγραμμα της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#3

Οι 100 εξαρτημένες πραγματώσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας εισήχθησαν στο μοντέλο υπόγειας ροής και έδωσε με τη σειρά του τις 100 απεικονίσεις του υδροφορέα, πάνω στις οποίες λύθηκε το πρόβλημα της βελτιστοποίησης των εξισώσεων 8.1-8.3 και προέκυψαν οι βέλτιστες θέσεις και παροχές των γεωτρήσεων και το καθαρό κέρδος για κάθε απεικόνιση.

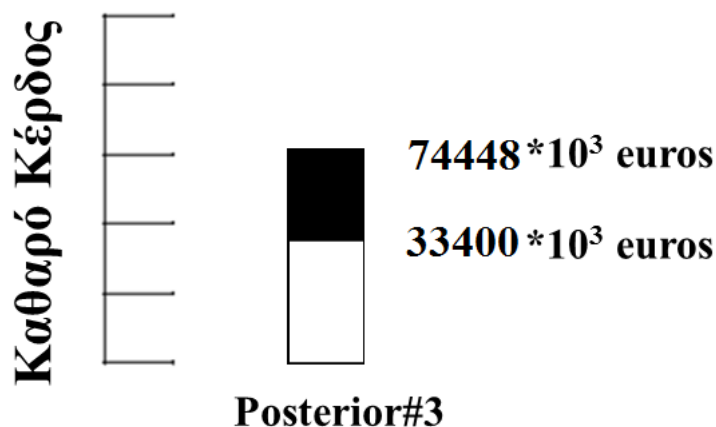


Σχήμα 8. 40. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα της εκ των υστέρων κατάστασης #3

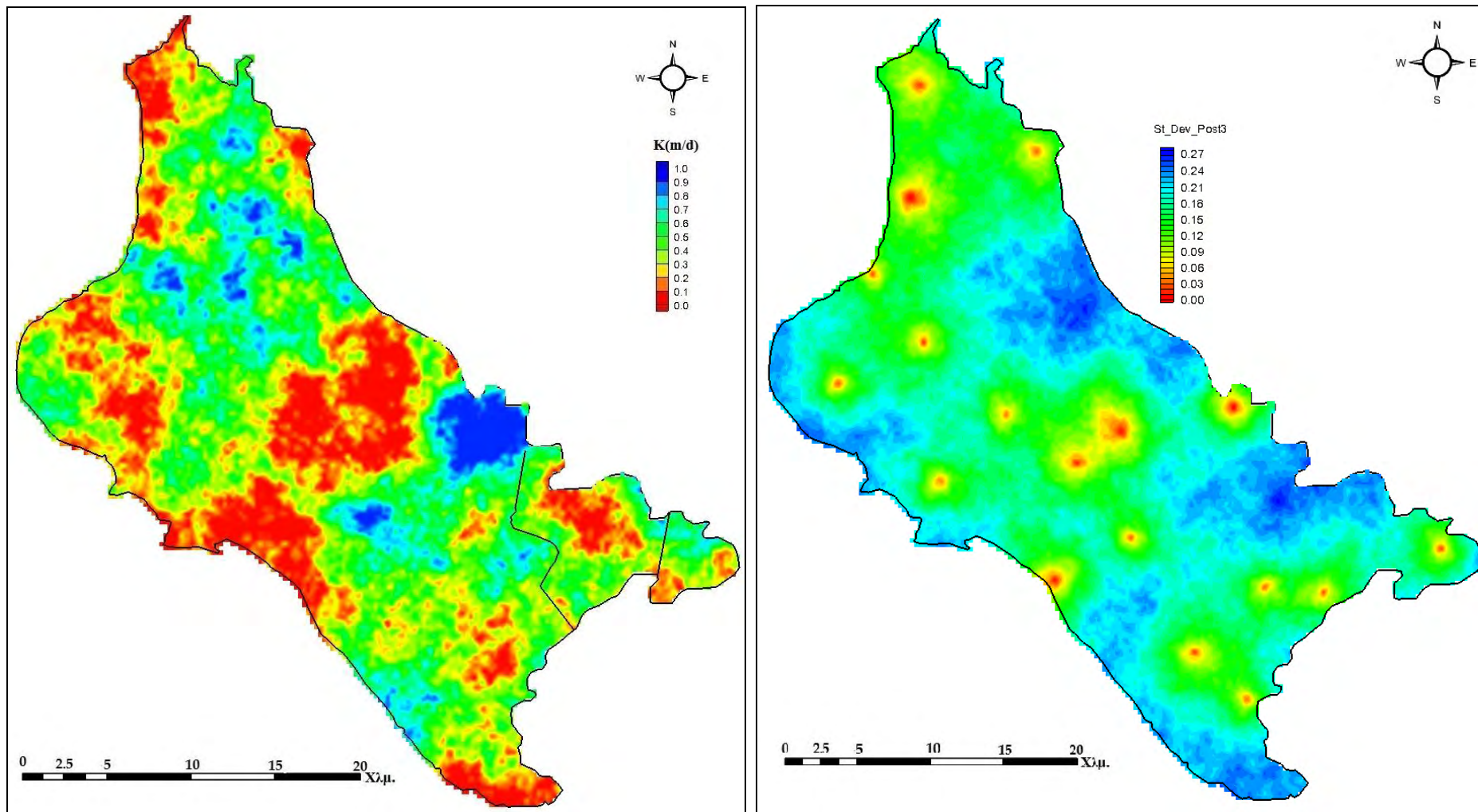


Σχήμα 8. 41. Διάγραμμα ετήσιου καθαρού κέρδους για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα της εκ των υστέρων κατάστασης #3

Ο ελάχιστος ετήσιος βέλτιστος όγκος είναι 9.357 hm^3 και ο μέγιστος 11.044 hm^3 με τη διαφορά τους να είναι 1.687 hm^3 . Το ελάχιστο ετήσιο καθαρό κέρδος είναι 202873 ευρώ και το μέγιστο είναι 236273 ευρώ με τη διαφορά του να είναι 33400 ευρώ. Επιπλέον μειώθηκε και το εύρος των γεωτρήσεων άντλησης το οποίο είναι από 36 έως 42 πηγάδια, η θέση των οποίων φαίνεται στο Σχήμα 8.33. Με βάση λοιπόν το σχεδιάγραμμα του Wagner (1999), η αξία της μέτρησης αυτής είναι $\text{VMI} = 41048$ ευρώ, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



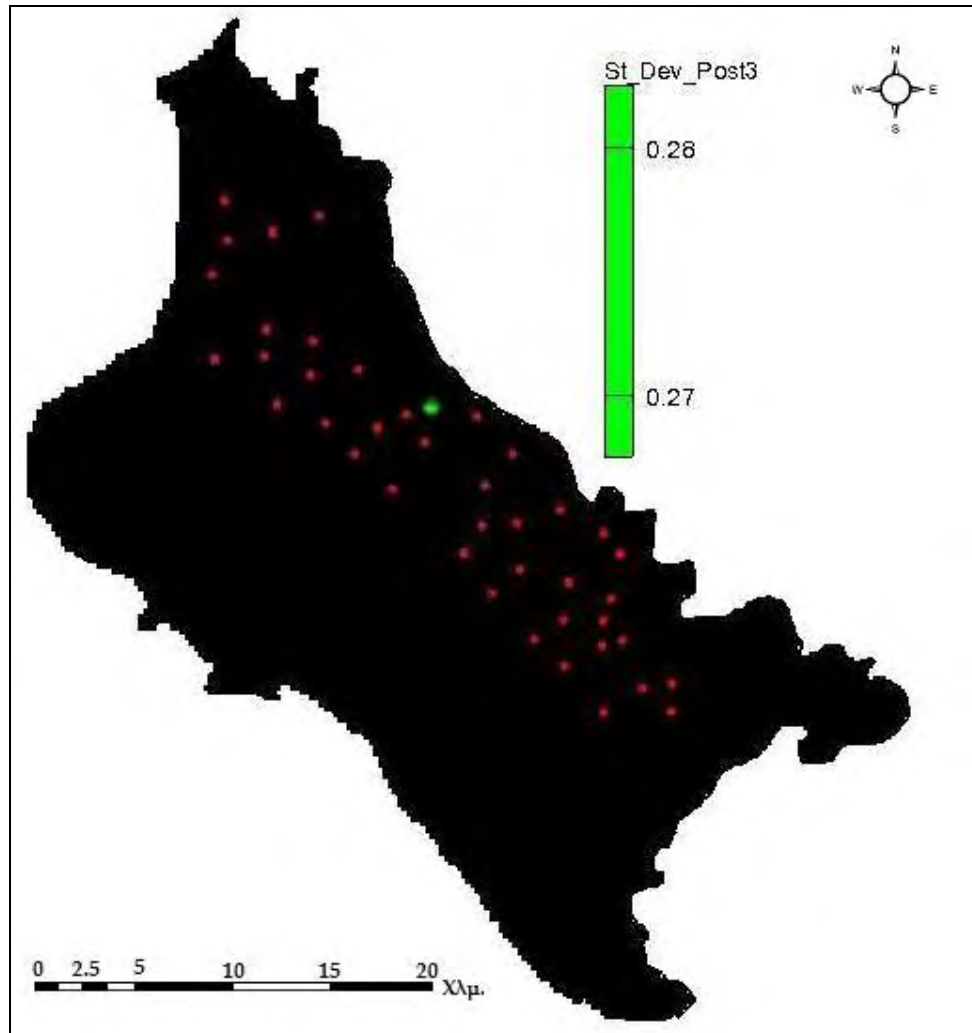
Σχήμα 8. 42. Αξία της πληροφορίας για την τρίτη δειγματοληπτική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας



Σχήμα 8. 43. Χάρτης της α. μέσης τιμής και β. της τυπικής απόκλισης των 100 εξαρτημένων πραγματώσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας για την εκ των υστέρων κατάσταση#3

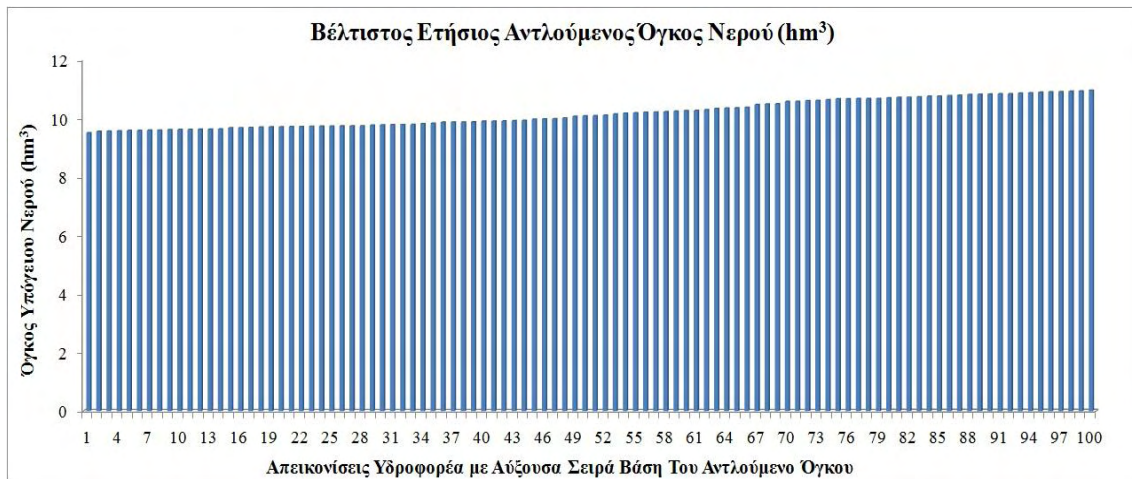
8.9. Προ εκ των υστέρων κατάσταση#4

Στον χάρτη του Σχήματος 8.44 φαίνεται η θέση της μέγιστης τυπικής απόκλισης (πράσινο χρώμα) του Σχήματος 8.43.β. και οι θέσεις των γεωτρήσεων άντλησης (κόκκινες βούλες).

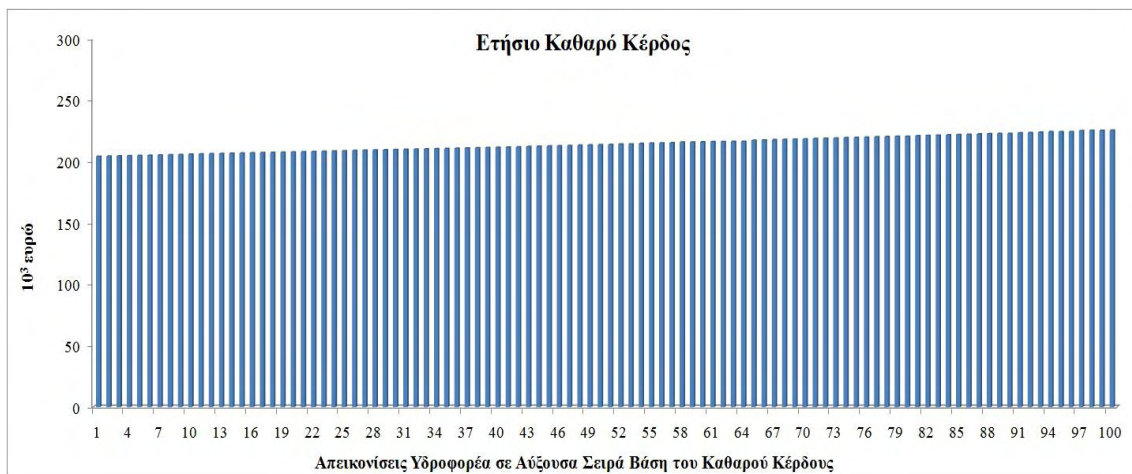


Σχήμα 8. 44. Θέση της μέγιστης τιμής της τυπικής απόκλισης της υδραυλικής αγωγιμότητας και θέσεις των γεωτρήσεων άντλησης για την εκ των υστέρων κατάσταση#3.

Η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας σε αυτήν τη θέση προκύπτει από τον χάρτη 8.43.α και είναι ίση με $3 \cdot 10^{-6}$ m/s. Τηρώντας το ίδιο ημιβαριόγραμμα (εξ. 8.7) εκτελείται η SGSIM εξαρτημένη στη θέση αυτή, παράγοντας 100 πραγματώσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας. Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία και προκύπτουν οι βέλτιστες θέσεις και παροχές των γεωτρήσεων και το καθαρό κέρδος για κάθε απεικόνιση για τη διαχειριστική περίοδο.



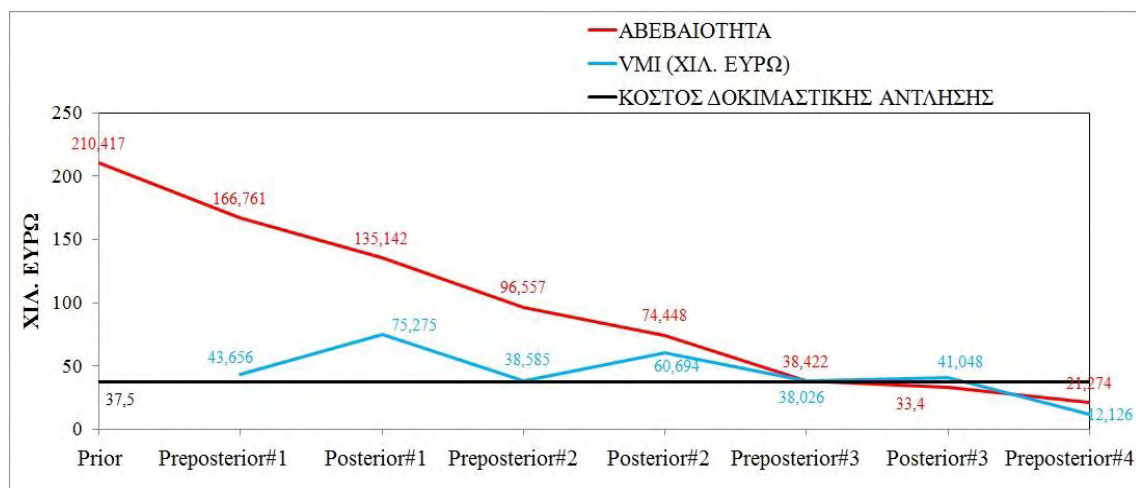
Σχήμα 8. 45. Διάγραμμα βέλτιστου ετήσιου αντλούμενου όγκου υπόγειου νερού για κάθε απεικόνιση του υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #4



Σχήμα 8. 46. Διάγραμμα ετήσιου καθαρού κέρδους για κάθε απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα της προ εκ των υστέρων κατάστασης #4

Ο ελάχιστος ετήσιος βέλτιστος όγκος είναι 9.505 hm^3 και ο μέγιστος 10.931 hm^3 με τη διαφορά τους να είναι 1.426 hm^3 . Το ελάχιστο ετήσιο καθαρό κέρδος είναι 203999 ευρώ και το μέγιστο είναι 225273 ευρώ με τη διαφορά του να είναι 21274 ευρώ. Η αξία της πληροφορίας της θεωρητικής τιμής #4 ισούται με τη διαφορά της οικονομικής αβεβαιότητας της εκ των υστέρων κατάστασης #3 με αυτής της προ εκ των υστέρων κατάστασης #4 και είναι 12126 ευρώ. Επειδή $VMI_{Pre\#4} < 37500$ ευρώ, η διαδικασία της αξίας της πληροφορίας τελειώνει εδώ, χωρίς να υπάρχει τέταρτη εκστρατεία λήψης δειγματοληπτικής τιμής.

Η αβεβαιότητα για την κάθε μία από τις τρεις καταστάσεις των εκστρατειών λήψης νέας δειγματοληπτικής τιμής και η αξία της πληροφορίας της κάθε μέτρησης – θεωρητικής και πραγματικής -παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.47. Επιβεβαιώνεται και από αυτό το γράφημα πως η αξία της πληροφορίας της πραγματικής μέτρησης είναι μεγαλύτερη από αυτή της θεωρητικής.

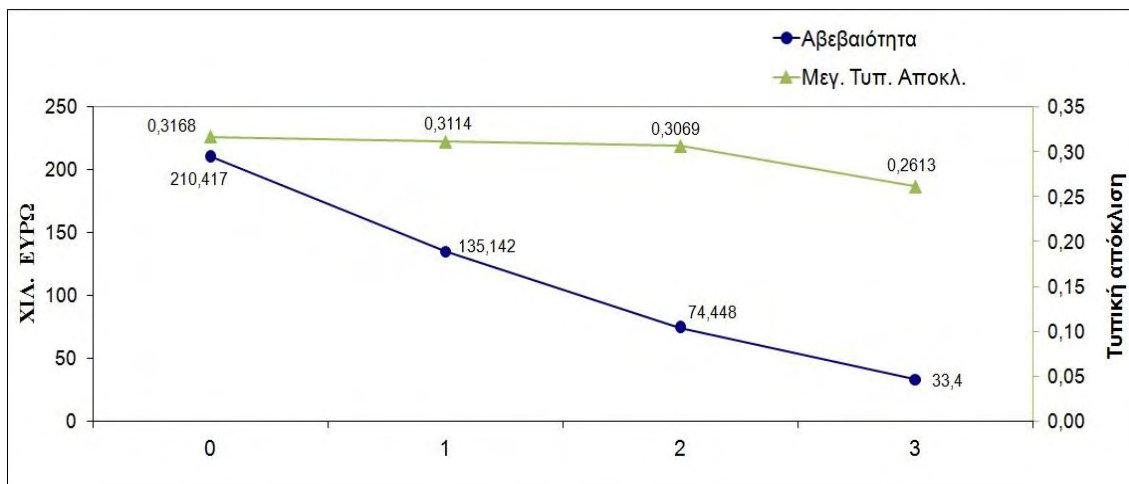


Σχήμα 8. 47. Αξία της πληροφορίας της κάθε νέας μέτρησης και οικονομική αβεβαιότητα της κάθε κατάστασης

Από το Σχήμα 8.43.β φαίνεται πως στο μεγαλύτερο μέρος του πεδίου μελέτης οι τιμές της τυπικής απόκλισης έχουν πλέον μειωθεί σημαντικά και αυτό με τη χρήση μόνο τριών επιπλέον δειγματοληπτικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας. Επιπλέον η σύγκριση των σχημάτων 8.8.β, 8.22, 8.33 και 8.45 δείχνει πως η λήψη νέας τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας, με την συγκεκριμένη στρατηγική δειγματοληψίας, οδηγεί σε μείωση της μέγιστης τιμής της τυπικής απόκλισης, το οποίο διαφαινόταν και από τα στατιστικά στοιχεία των δειγματοληπτικών τιμών (Σχ.7.16, Σχ.8.15, Σχ.8.26 και Σχ. 8.37). Δηλαδή η αξία της νέας πληροφορίας πάνω στη μείωση της υδρογεωλογικής αβεβαιότητας είναι διπλή:

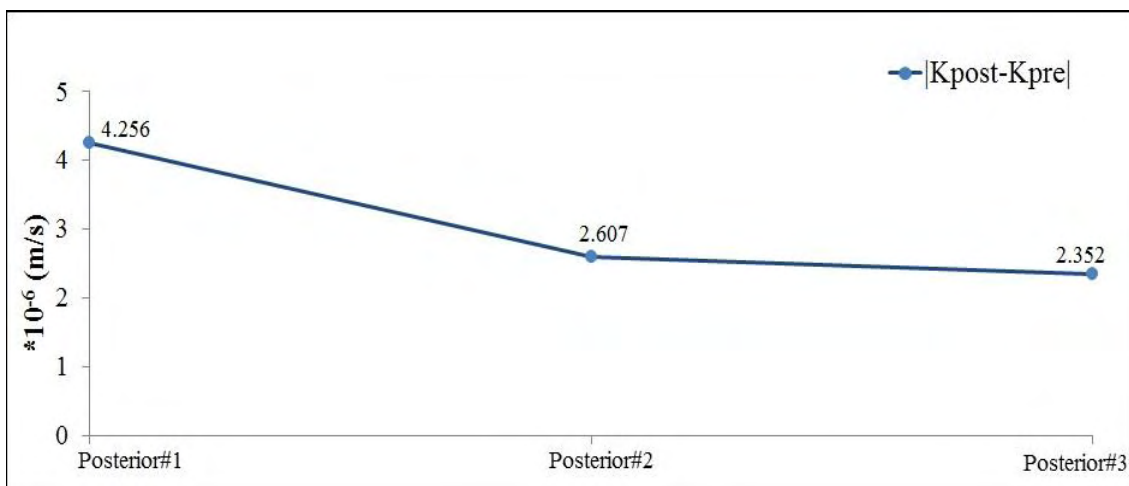
1. Μείωση αυτής χωρικά στο πεδίο μελέτης
2. Μείωση των μέγιστων τιμών της τυπικής απόκλισης (Σχ. 8.48)

Η διπλή αυτή συνεισφορά, αν μη τι άλλο, επιβεβαιώνει την επιλογή της στρατηγικής δειγματοληψίας. Και όλα αυτά, αν λάβει κανείς υπόψη του πως κριτήριο για να σταματήσει η λήψη νέας μέτρησης είναι ένας οικονομικός όρος, το κόστος λήψης αυτής. Και όμως παρόλο που τελικός στόχος αποτελεί η μείωση της οικονομικής αβεβαιότητας, επιτυγχάνεται εν τέλει ικανοποιητική μείωση της υδρογεωλογικής αβεβαιότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, το οποίο έχει ήδη αναφερθεί, ότι είναι η υδρογεωλογική αβεβαιότητα που προκαλεί την οικονομική. Ο λόγος που η οικονομική αβεβαιότητα αποτελεί τον τελικό στόχο της διαχείρισης οφείλεται καθαρά στην τάξη μεγέθους της αβεβαιότητας και στον αντίκτυπο που έχει η καθεμία. Η σύγκριση αυτή φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 8.48.



Σχήμα 8. 48. Οικονομική αβεβαιότητα και μέγιστη τυπική απόκλιση για κάθε κατάσταση

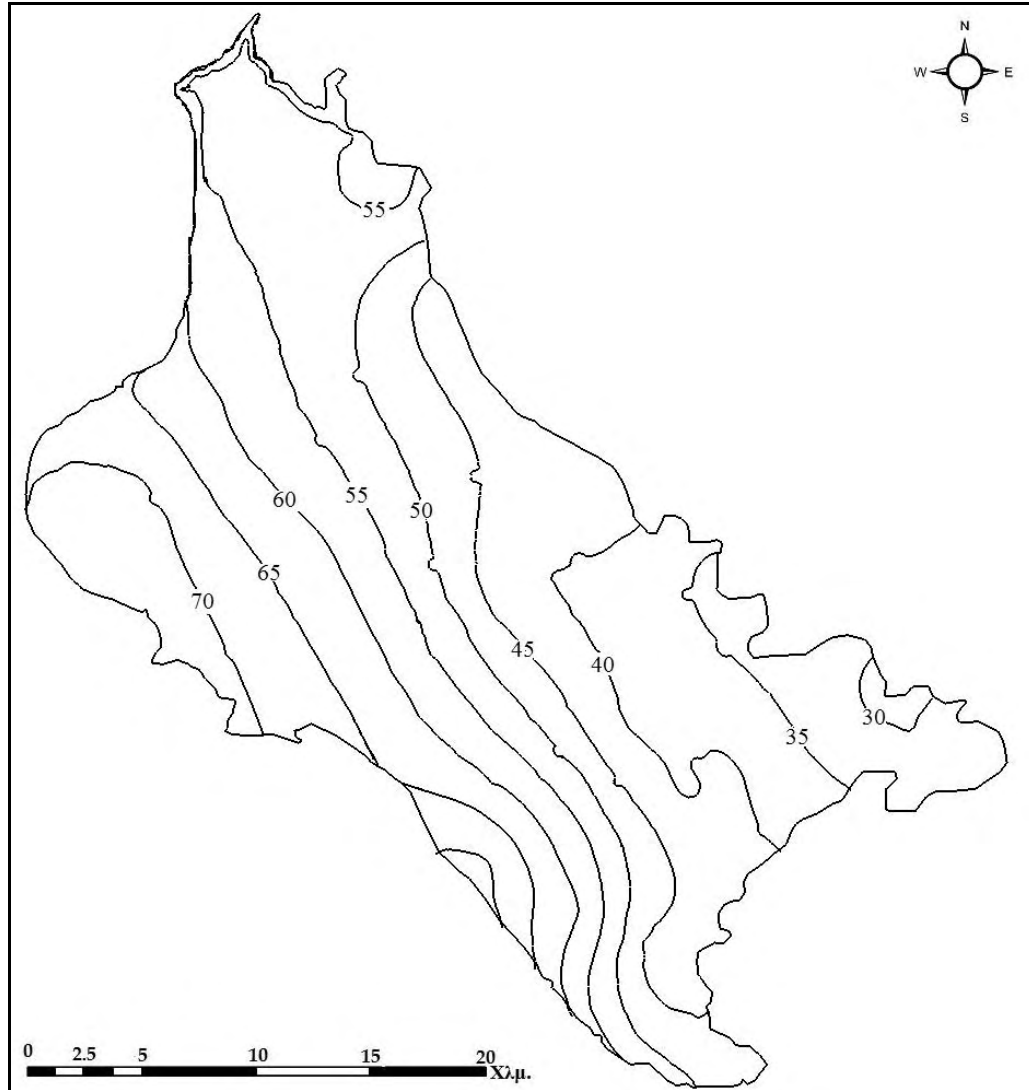
Συνέπεια του παραπάνω γεγονότος αποτελεί και η σύγκλιση των θεωρητικών τιμών των προ εκ των υστέρων καταστάσεων με τις πραγματικές τιμές των εκ των υστέρων καταστάσεων. Υπενθυμίζεται εδώ, πως η θεωρητική τιμή της προ εκ των υστέρων καταστάσεων προέρχεται από τον χάρτη των μέσων τιμών των 100 πραγματώσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας της προηγούμενης εκ των υστέρων κατάστασης. Με τη μείωση της τυπικής απόκλισης, οι μέσες τιμές τείνουν να προσεγγίσουν τις πραγματικές. Στο διάγραμμα του Σχήματος 8.49 φαίνεται η απόλυτη διαφορά ανάμεσα στη θεωρητική τιμή (μέση τιμή) και στην πραγματική για κάθε κατάσταση.



Σχήμα 8. 49. Απόλυτη διαφορά της πραγματικής τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας με τη θεωρητική για κάθε κατάσταση.

Οι θέσεις των εναπομεινάντων γεωτρήσεων φαίνονται στο Σχήμα 8.44 με κόκκινες βούλες. Πρέπει να σημειωθεί εδώ πως ήδη από την εκ των προτέρων κατάσταση μόνο στο δυτικό τμήμα του υπόγειου υδροφορέα πραγματοποιείται άντληση υπόγειου νερού. Αρχικά συμμετείχαν οι ζώνες 3-6 και κατέληξαν στην εκ των υστέρων κατάσταση #3 να συμμετέχουν μόνο οι 3,5 και 6. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως ήδη πριν καν αρχίσει η διαχειριστική περίοδος 2012-2044, το δυτικό και νοτιοδυτικό τμήμα του πεδίου μελέτης ήταν το πιο υποβαθμισμένο ποσοτικά σε υπόγεια ύδατα (Σχήμα 5.10).

Οι μέσες τιμές των υδραυλικών υψών των 100 βέλτιστων απεικονίσεων της εκ των υστέρων κατάστασης#3 για το 2044, παρουσιάζονται στο χάρτη του σχήματος 8.50. Η σύγκριση του εν λόγω χάρτη με το χάρτη στο Σχήματος 7.25 αποτυπώνει ξεκάθαρα πως ο στόχος της ανύψωσης της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα έχει επιτευχθεί. Οι δύο χάρτες είναι σχεδόν όμοιοι.

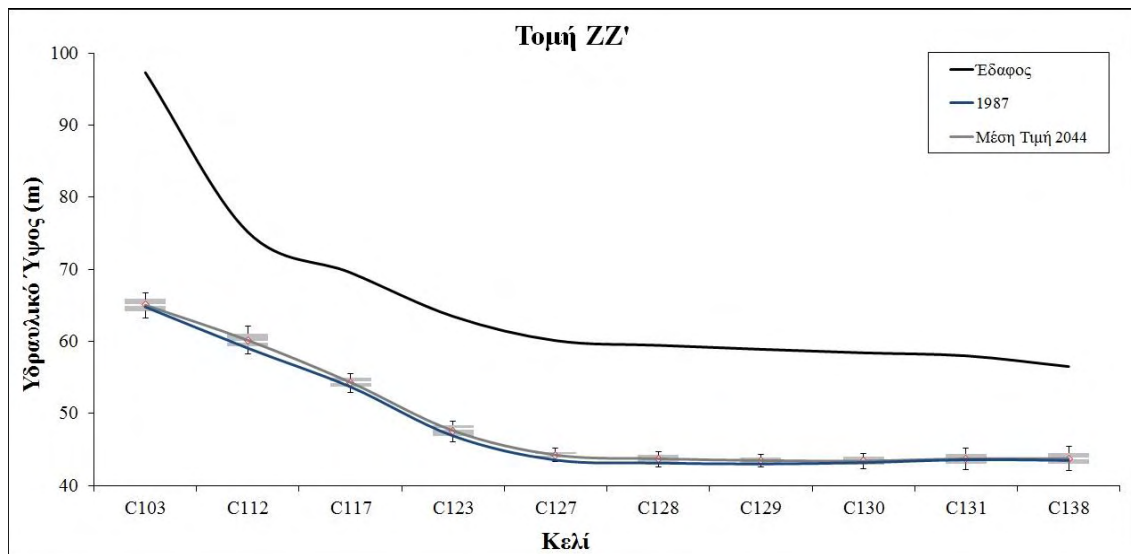


Σχήμα 8. 50. Χάρτης των μέσων τιμών των υδραυλικών υψών των 100 βέλτιστων απεικονίσεων του υπόγειου υδροφορέα της εκ των υστέρων κατάστασης#3 για το 2044.

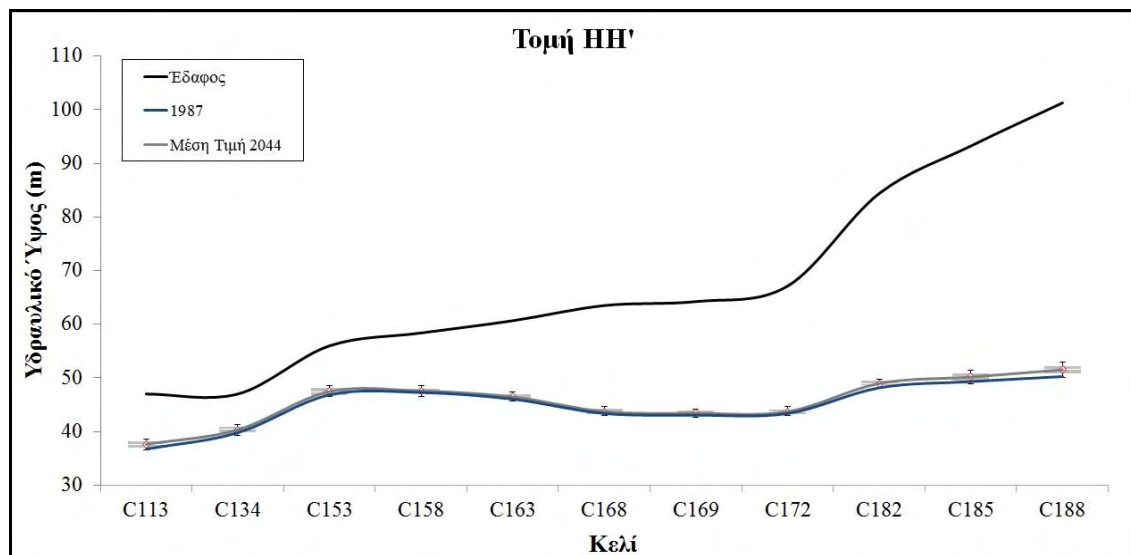
Επιπλέον, παρουσιάζονται οι τομές του Σχήματος 7.38 για τα μέσα υδραυλικά ύψη του 2044 και τα θηκογράμματα αυτών, ώστε να εκτιμηθεί σε αυτή την κατάσταση η υδρογεωλογική αβεβαιότητα. Η σύγκριση του Σχήματος 7.39 με το Σχήμα 8.51, οδηγεί σε δύο σημαντικά συμπεράσματα για τους στόχους, που αυτή η έρευνα έθεσε:

1. Επιτεύχθηκε μια πολύ ικανοποιητική σύγκλιση των μέσων υδραυλικών υψών των 100 βέλτιστων απεικονίσεων του υπόγειου υδροφορέα με τα υδραυλικά ύψη του έτους στόχου (1987) για την ανύψωση αυτών.
2. Επιτεύχθηκε ικανοποιητική μείωση της αβεβαιότητας της υδραυλικής αγωγιμότητας στα παραγόμενα υδραυλικά ύψη. Τόσο τα εύρη του 1^{ου} και 3^{ου}

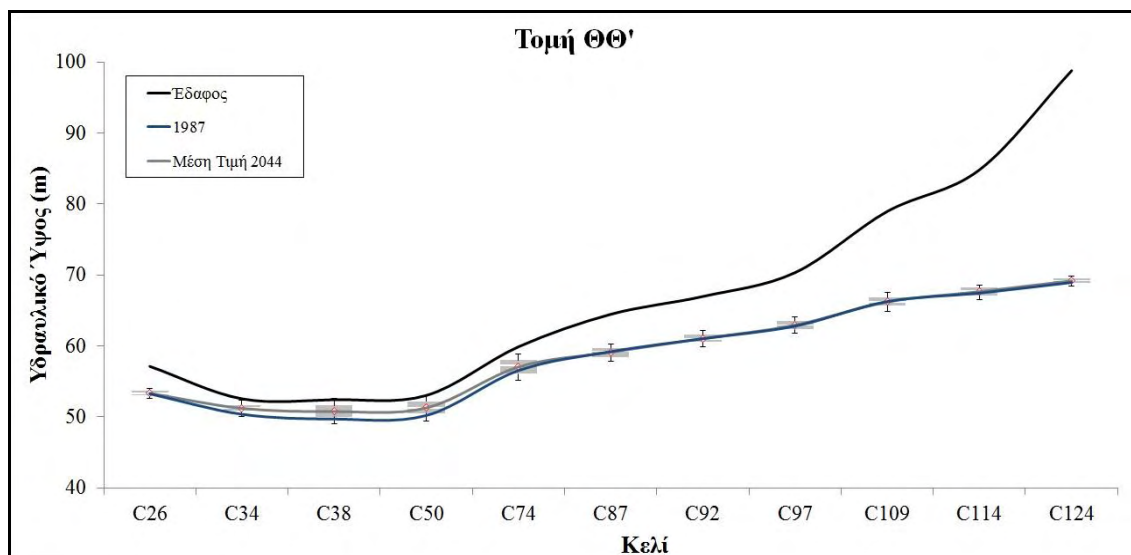
τεταρτημορίου, όσο και τα φράγματα των θηκογραμμάτων, έχουν μειωθεί σημαντικά. Η μείωση της διαφοράς του 1^{ου} και 3^{ου} τεταρτημορίου αγγίζει ακόμη και τα δέκα μέτρα σε κάποια κελιά, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.1.



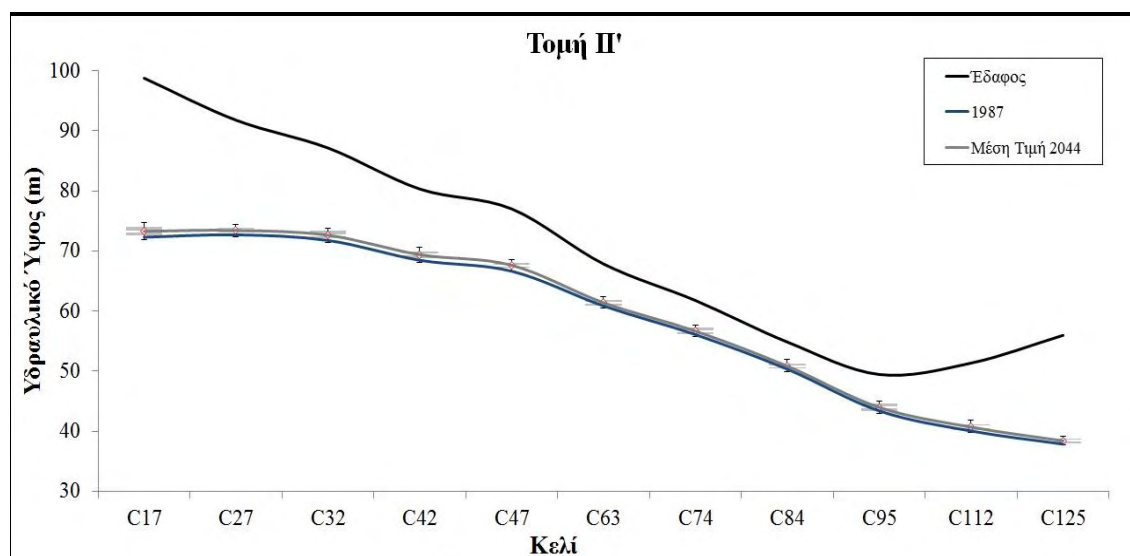
α.



β.



γ.



δ.

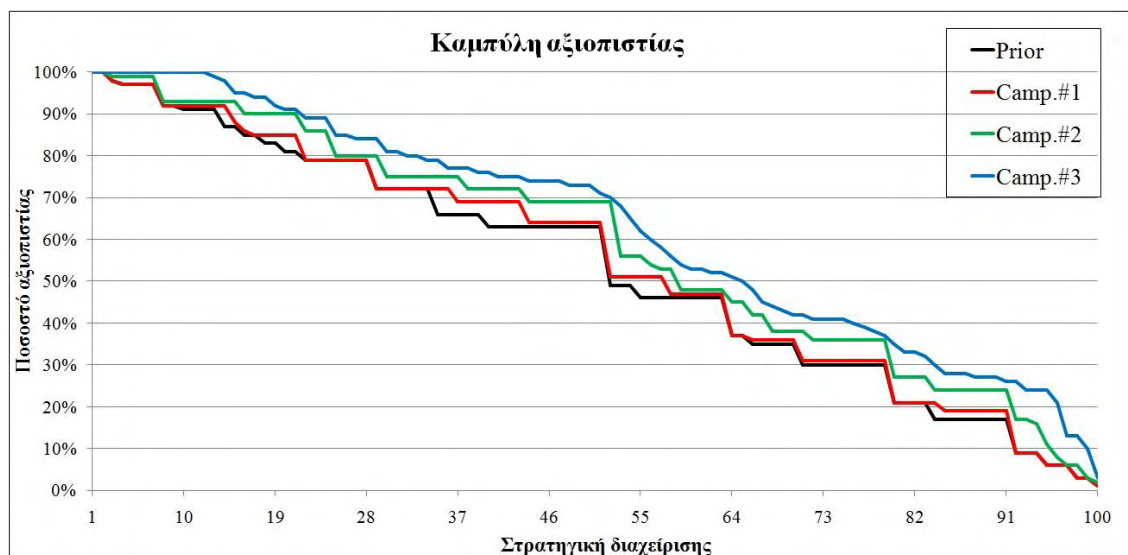
Σχήμα 8. 51. Θηκογράμματα των 100 υδραυλικών υψών της 01/2044, υψόμετρο εδάφους και ύψος αρχικών συνθηκών (01/1987), σε συγκεκριμένα κελιά των τομών: α. ΖΖ', β. ΗΗ', γ. ΘΘ' και δ. ΙΙ'

Πίνακας 8. 1. Διαφορές των τιμών 1^{ου} και 3^{ου} τεταρτημορίου σε μέτρα των θηκογραμμάτων των 100 στοχαστικών υδραυλικών υψών για τις τομές ΖΖ', ΗΗ', ΘΘ' και ΙΙ' για την 01/ 2044.

Τομή ΖΖ'											
	C103	C112	C117	C123	C127	C128	C129	C130	C131	C138	
2012	5.274	8.062	8.712	11.002	8.263	9.106	8.50	7.030	6.636	4.670	
2044	1.630	1.786	1.263	1.551	0.772	0.917	0.856	1.040	1.392	1.525	
Τομή ΗΗ'											
	C113	C134	C153	C158	C163	C168	C169	C172	C182	C185	C188
2012	3.100	7	6	10	11	11	11	10	8.688	6.838	1.219
2044	1.118	1.009	1.240	0.952	0.858	0.924	0.878	0.803	0.826	1.259	1.205

Τομή ΘΘ'											
	C26	C34	C38	C50	C74	C87	C92	C97	C109	C114	C124
2012	4.833	7.298	7.813	4.514	8.088	9.243	7.500	7.425	8.566	10.383	11.102
2044	0.598	0.838	1.605	1.657	1.919	1.255	1.024	1.211	1.086	1.044	0.667
Τομή ΙΙ'											
	C17	C27	C32	C42	C47	C63	C74	C84	C95	C112	C125
2012	4.105	5.213	5.348	5.821	4.192	4.868	4.182	4.761	9.801	1.430	0.213
2044	2.175	1.604	1.985	1.854	1.427	1.422	1.461	1.380	1.673	1.289	0.117

Ο έλεγχος της αξιοπιστίας της στοχαστικής βελτιστοποίησης πραγματοποιείται με τη χρήση της καμπύλης αξιοπιστίας των βέλτιστων στρατηγικών διαχείρισης. Στο Σχήμα 8.52 παρουσιάζονται οι καμπύλες αξιοπιστίας της εκ των προτέρων πληροφορίας και της πληροφορίας έπειτα από κάθε καμπάνια δειγματοληψίας. Οι στρατηγικές διαχείρισης έχουν τοποθετηθεί σε αύξουσα σειρά ανάλογα του μέσου ετήσιου αντλούμενου όγκου νερού, όπως στα Σχήματα 8.4, 8.18, 8.29, 8.40.



Σχήμα 8. 52. Καμπύλες αξιοπιστίας των βέλτιστων στρατηγικών διαχείρισης για την αρχική πληροφορία και την πληροφορία προερχόμενη από τις τρεις καμπάνιες δειγματοληψίας.

Είναι προφανής η σημαντική αύξηση της αξιοπιστίας της κάθε στρατηγικής με τη χρήση της νέας πληροφορίας της παραμέτρου. Εδώ διαφαίνεται και μια άλλη χρησιμότητα της αξίας της πληροφορίας. Και αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί από το γεγονός πως η αξιοπιστία εξαρτάται άμεσα από την αβεβαιότητα. Μειώνοντας, λοιπόν, την αβεβαιότητα, μειώνεται το ρίσκο που αυτή επιφέρει και αυξάνεται η αξιοπιστία. Το διάγραμμα του Σχήματος 8.52 αποτελεί και το επιστέγμα του προτεινόμενου εργαλείου μιας και ο διαχειριστής έχει στη διάθεση του ένα εύρος βέλτιστων στρατηγικών διαχείρισης με το βαθμό αξιοπιστίας της καθεμιάς, ώστε να επιλέξει όποια αυτός κρίνει καταλληλότερη κάθε φορά.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

9.1. Γενικά συμπεράσματα διατριβής

Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο αποκατάστασης και βιώσιμης διαχείρισης ενός περιβαλλοντικά υποβαθμισμένου υπόγειου υδροφορέα. Η όλη προσέγγιση έγινε από την οπτική γωνία της επιχειρησιακής εφαρμογής που προϋποθέτει εύλογο υπολογιστικό φόρτο και αξιόπιστες χωρικές και χρονικές προσομοιώσεις, υπό συνθήκες αβεβαιότητας. Για τον λόγο αυτό, ένα σύστημα μοντέλων προσομοίωσης δημιουργήθηκε και εφαρμόστηκε επιτυχώς στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κάρλας. Τόσο η στοχαστική προσομοίωση, όσο και η διαχείριση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δύο επιπλέον μοντέλων, τα οποία συνεργάστηκαν με το μοντέλο υπόγειας ροής. Η αβεβαιότητα, αφορούσε καθαρά στην προσομοίωση της υπόγειας ροής, μιας και αυτή οφείλεται τόσο στην έλλειψη επαρκών δεδομένων, όσο και στη χωρική μεταβλητότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας. Η εφαρμογή των υπόλοιπων μοντέλων προσομοίωσης των υδατικών πόρων της λεκάνης ήταν ντετερμινιστική.

Η αποκατάσταση και διαχείριση του υπόγειου υδροφορέα αφορούν στη μελλοντική περίοδο 2012-2044, κατά την οποία λειτουργεί ο ταμιευτήρας της Κάρλας και λαμβάνονται υπόψη όλα τα περιβαλλοντικά οφέλη του. Μία καινοτόμα μεθοδολογία της ανάλυσης αποφάσεων εφαρμόστηκε για τη μείωση της αβεβαιότητας τόσο στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όσο και στα αποτελέσματα της διαχείρισης, στηριζόμενη σε μία στρατηγική λήψης νέας πληροφορίας από το πεδίο και ανανέωσης αυτής με τη χρήση της ανάλυσης κατά Bayes.

Από το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο παράγεται, ουσιαστικά, ένα διαχειριστικό εργαλείο ενός υπόγειου υδροφορέα, το οποίο προτείνει στον διαχειριστή τις βέλτιστες, από περιβαλλοντικής και οικονομικής σκοπιάς, στρατηγικές αποκατάστασης και διαχείρισης. Για την πραγματοποίηση, όμως των παραπάνω, απαιτείται σε πρώτη φάση εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης του υπόγειου υδροφορέα, μιας και από αυτή θα προκύψουν οι προτεινόμενες λύσεις. Η επί πλέον δυσκολία του εγχειρήματος εργαλείου έγκειται στο γεγονός πως αυτές οι βέλτιστες λύσεις εξετάζονται αναγκαστικά υπό συνθήκες αβεβαιότητας, γεγονός που γεννά ρίσκο στις αποφάσεις. Το πρόβλημα αυτό προσεγγίζεται με τη χρήση της αξίας της πληροφορίας, η οποία μειώνοντας την παραμετρική αβεβαιότητα οδηγεί σε μείωση και της αντίστοιχης οικονομικής αβεβαιότητας και παρέχει βέλτιστες και αξιόπιστες στρατηγικές διαχείρισης στον διαχειριστή του συστήματος.

Το εργαλείο αυτό δεν περιορίζεται αναγκαστικά στο εξεταζόμενο πεδίο μελέτης, καθώς δύναται να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε λεκάνη απορροής, με κοκκώδη υπόγειο υδροφορέα. Σε αυτήν την περίπτωση το μεθοδολογικό πλαίσιο παραμένει αναλλοίωτο, ενσωματώνοντας εύκολα τις απαιτούμενες αλλαγές που υπεισέρχονται στα

χαρακτηριστικά του πεδίου μελέτης. Επίσης, η δυνατότητα εφαρμογής του δεν περιορίζεται ούτε και από την αβέβαιη παράμετρο, καθώς στη θέση της υδραυλικής αγωγιμότητας μπορεί να εξετασθεί οποιοδήποτε άλλη παράμετρος του μοντέλου υπόγειας ροής.

9.2. Ειδικά συμπεράσματα διατριβής

Ειδικότερα, η μελέτη κατέληξε στα παρακάτω ειδικά συμπεράσματα ως προς την τεχνική ανάπτυξης της μεθοδολογίας:

Το προτεινόμενο σύστημα μοντέλων προσομοίωσης αποτυπώνει επιτυχώς την ποσοτική κατάσταση των υδατικών πόρων σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Κάθε μοντέλο προσομοίωσης ρυθμίστηκε επιτυχώς έναντι παρατηρούμενων τιμών και απέδωσε χρονοσειρές αποτελεσμάτων της ποσοτικής κατάστασης των υδατικών πόρων της λεκάνης απορροής. Με βάση τα παραπάνω δίνεται μια ολοκληρωμένη εικόνα της λεκάνης απορροής, η οποία τελικά είναι φτωχή σε υδατικό δυναμικό. Απόρροια αυτού είναι η περιβαλλοντική υποβάθμιση του υπόγειου υδροφορέα της Κάρλας. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης είναι αυτή που καθορίζει και τα απαραίτητα διαχειριστικά μέτρα, που πρέπει να παρθούν για την αντιστροφή της υπάρχουσας κατάστασης.

Η συνδυασμένη χρήση των μοντέλων προσομοίωσης και η βέλτιστη χωρική δομή του μοντέλου προσομοίωσης της επιφανειακής απορροής με το μοντέλο της υπόγειας ροής οδηγεί σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα απόκρισης του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα η προτεινόμενη χωρική δομή των δύο μοντέλων επιτυγχάνει την εκτίμηση της πραγματικής κατείσδυσης που καταλήγει στον υπόγειο υδροφορέα. Αυτό είναι αρκετά σημαντικό για την αξιοπιστία του συστήματος προσομοίωσης, μιας και η κατείσδυση αποτελεί ένα από τα δεδομένα σύνδεσης των μοντέλων.

Η χρήση των γεωστατιστικών εργαλείων για την στοχαστική προσομοίωση της υδραυλικής αγωγιμότητας, αποτελεί αξιόπιστη λύση για την εκτίμηση της αβεβαιότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η εν λόγω αβεβαιότητα οφείλεται στη χωρική μεταβλητότητα και στην έλλειψη επαρκών δειγματοληπτικών τιμών της παραμέτρου και η γεωστατιστική προσέγγιση είναι η καταλληλότερη μέθοδος για την εκτίμηση αυτής.

Η εξαρτημένη, τόσο στις δειγματοληπτικές τιμές της παραμέτρου, όσο και στα υδραυλικά ύψη του υπόγειου υδροφορέα, στοχαστική προσομοίωση σε συνδυασμό με την κατάλληλη ρύθμιση του μοντέλου υπόγειας ροής δίνουν περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα σε σχέση με την αντίστοιχη ανεξάρτητη στοχαστική προσομοίωση. Η ρύθμιση του μοντέλου υπόγειας ροής πραγματοποιήθηκε σε συνδυασμό με την εφαρμογή του μοντέλου γεωστατιστικής δίνοντας έτσι τη βέλτιστη χωρική δομή που διέπει την υδραυλική αγωγιμότητα. Ο συνδυασμός αυτός επέτρεψε και την παραγωγή μικρού αριθμού στοχαστικών απεικονίσεων του υπόγειου υδροφορέα.

Η χρήση της γεωστατιστικής προσέγγισης επιτρέπει την εκτίμηση του βαθμού επηρεασμού των αποτελεσμάτων προσομοίωσης από την αβεβαιότητα, σε χωρική

κλίμακα, τόσο τοπικά, όσο και σε επίπεδο περιοχής μελέτης, γεγονός το οποίο παρέχει στον ερευνητή/μελετητή την κατάλληλη και ορθή πληροφορία για τη δραστικότερη μείωσή της. Αυτό πραγματοποιείται με την παραγωγή χαρτών της τυπικής απόκλισης των πραγματώσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας, που χρησιμοποιείται ως εργαλείο για τη στρατηγική λήψης της νέας δειγματοληπτικής τιμής της παραμέτρου από το πεδίο.

Ο συνδυασμός μοντέλων προσομοίωσης και διαχείρισης αξιολογείται ως ο πλέον ενδεδειγμένος τρόπος για τη βέλτιστη διαχείριση υπόγειων υδατικών συστημάτων, αφού λαμβάνονται υπόψη όλες οι περίπλοκες φυσικές διεργασίες του συστήματος και εξάγονται ρεαλιστικά αποτελέσματα. Με βάση αυτό το συνδυασμό εξετάζεται κάθε φορά τόσο η επιτυχής απόκριση της κάθε βέλτιστης στρατηγικής διαχείρισης, που η στοχαστική βελτιστοποίηση αποδίδει, όσο και η αξιοπιστία της.

Η στοχαστική βελτιστοποίηση είναι μία αξιόπιστη μεθοδολογία παραγωγής βέλτιστων στρατηγικών διαχείρισης ενός υπόγειου υδροφορέα υπό συνθήκες αβεβαιότητας και μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τη χάραξη τέτοιων στρατηγικών. Έτσι, στην ανάλυση της αξίας της πληροφορίας συμμετέχουν εκείνες οι στρατηγικές διαχείρισης, οι οποίες πληρώντας τον περιβαλλοντικό περιορισμό της ανύψωσης της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα έδωσαν και το μέγιστο καθαρό κέρδος από την πώληση του «επιτρεπόμενου» ανανεώσιμου υπόγειου ύδατος.

Η αξία της πληροφορίας κρίνεται ως μια επιτυχής και αξιόπιστη προσέγγιση της ανάλυσης αποφάσεων για τη μείωση της παραμετρικής και της αντίστοιχης οικονομικής αβεβαιότητας. Η μείωση αυτή μπορεί να φτάσει στη μέγιστη τιμή της με την προτεινόμενη μεθοδολογία. Η επιτυχία της έγκειται στο γεγονός πως ενώ κριτήριο για τη μεθοδολογία της αποτελεί η μείωση της οικονομικής αβεβαιότητας, με τη χρήση του αντιστρόφου προβλήματος, επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της υδρογεωλογικής αβεβαιότητας, ακόμη και με τη λήψη μικρού αριθμού νέων δειγματοληπτικών τιμών από το πεδίο. Συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία η επίδραση της υδρογεωλογικής αβεβαιότητας στην εκτίμηση των υδραυλικών υψών μειώθηκε ακόμη και στο 1/10. Η δε οικονομική αβεβαιότητα μειώθηκε στο 1/6.

Η εφαρμογή της ανάλυσης της αξίας της πληροφορίας πάνω στην ποσοτική διαχείριση ενός πραγματικού υπόγειου υδροφορέα καθιστά την παρούσα διδακτορική διατριβή καινοτόμα. Και αυτό γιατί, η εν λόγω ανάλυση προέρχεται από την επιστήμη των οικονομικών και πρόσφατα έχει εφαρμοστεί σε προβλήματα ποιοτικής διαχείρισης υπόγειων υδατικών συστημάτων. Η εφαρμογή της σε προβλήματα ποσοτικής διαχείρισης έχει επιτευχθεί παγκοσμίως μόνο σε μία εργασία και αυτή δεν αφορά πραγματικό υπόγειο υδροφορέα.

Η χρήση της ανάλυσης Bayes κατά την εφαρμογή της αξίας της πληροφορίας κρίνεται ως εξόχως σημαντική, μιας και προστατεύει το διαχειριστή από οικονομική σπατάλη. Αυτό επιτυγχάνεται κατά την προ εκ των υστέρων κατάσταση, στην οποία ο διαχειριστής έχει μια εκτίμηση αν τον συμφέρει οικονομικά να επενδύσει για τη λήψη της νέας δειγματοληπτικής τιμής της παραμέτρου από το πεδίο.

Η επιλογή της νέας πληροφορίας της παραμέτρου από τη θέση εκείνη, η οποία παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της τυπικής απόκλισης των πολλαπλών κατανομών της, έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στη μείωση της αβεβαιότητας, τόσο σε τοπική κλίμακα, όσο και συνολικά στο πεδίο μελέτης. Αυτή η στρατηγική είναι αποτέλεσμα της συνδυασμένης χρήσης των αποτελεσμάτων της στοχαστικής προσομοίωσης και βελτιστοποίησης.

Η επιλογή της συγκεκριμένης στρατηγικής λήψης νέων τιμών της παραμέτρου από το πεδίο οδηγεί στη σημαντική μείωση της υδρογεωλογικής αβεβαιότητας και εν συνεχεία της οικονομικής ακόμη και με τη λήψη μικρού αριθμού νέων τιμών. Στην παρούσα εργασία, απαιτήθηκαν μόλις τρεις εκστρατείες λήψης νέας δειγματοληπτικής τιμής της παραμέτρου.

Ο συνδυασμός χρήσης της στοχαστικής βελτιστοποίησης και της αξίας της πληροφορίας αποτελεί μία καινοτόμο μεθοδολογία για τη λήψη των βέλτιστων και αξιόπιστων αποφάσεων πάνω στη διαχείριση ενός υπόγειου υδατικού συστήματος. Η κάθε στρατηγική διαχείρισης από μόνη της αποτελεί μία βέλτιστη λύση στο βαθμό που προέκυψε από την εφαρμογή της μεθόδου βελτιστοποίησης. Η σύγκριση των ίσης πιθανότητας, πολλαπλών αυτών στρατηγικών αποτυπώνει το ρίσκο που υπεισέρχεται στη λήψη της ορθής και βέλτιστης απόφασης από τον διαχειριστή.

Το ρίσκο αυτό μειώνεται σταδιακά μέσω του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία των στρατηγικών διαχείρισης, που ο διαχειριστής καλείται να επιλέξει. Συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία η αξιοπιστία αυτή ανάμεσα στην αρχική και τελική πληροφορία (έπειτα από τις τρεις εκστρατείες λήψης της νέας τιμής) αυξάνει σε ποσοστό μέχρι και 22%.

Το διαχειριστικό εργαλείο, το οποίο στηρίζεται στο προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο επιχειρησιακής εφαρμογής, τόσο από δημόσιους, όσο και από ιδιωτικούς φορείς, τόσο σε τοπικό-περιφερειακό, όσο και σε εθνικό επίπεδο, για την επίλυση παρόμοιων προβλημάτων.

Το διαχειριστικό εργαλείο κρίνεται ως ωφέλιμο και συνάμα ρεαλιστικό, γιατί προτείνει εκείνες τις στρατηγικές διαχείρισης, οι οποίες θα προστατέψουν το περιβάλλον, μέσω της βιώσιμης διαχείρισης των υπόγειων υδάτων, αλλά με το μικρότερο δυνατό κόστος προσβλέποντας έτσι και στην οικονομική βιωσιμότητα.

9.3. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η παρούσα έρευνα, παρόλο που καλύπτει μία μεγάλη γκάμα εφαρμογών στις επιστήμες της υδρολογίας και της διαχείρισης των υδατικών πόρων, με την παράλληλη χρήση πολλών μεθοδολογιών, δύναται να δεχθεί περαιτέρω διερεύνηση και εξέλιξη, όπως:

- Το προτεινόμενο εργαλείο δύναται να γίνει πιο αξιόπιστο με τη συνεχή ανανέωση των χρονοσειρών των χρονικά μεταβαλλόμενων δεδομένων. Αυτό θα απαιτούσε την εγκατάσταση τηλεμετρικού δικτύου για τη άμεση συλλογή των εν λόγω δεδομένων.

- Για την άμεση συνεργασία των μοντέλων προσομοίωσης μπορεί χρησιμοποιηθεί μία πλατφόρμα συνεργασίας, μέσω της οποίας να εφαρμόζεται η αυτοματοποιημένη εκτέλεση του συστήματος.
- Για τη περαιτέρω μείωση του υπολογιστικού χρόνου εκτέλεσης των στοχαστικών διεργασιών μπορεί να δημιουργηθεί ένας εξειδικευμένος κώδικας μέσω γλώσσας προγραμματισμού.
- Εξετάσθηκε η αβεβαιότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας, ενώ τα υπόλοιπα μοντέλα προσομοίωσης εκτελέστηκαν ντετερμινιστικά. Θα μπορούσαν να εξετασθούν και άλλες παράμετροι, τόσο του μοντέλου υπόγειας ροής, όσο και των υπολοίπων, αρκεί να μην αυξηθεί σημαντικά ο υπολογιστικός χρόνος και ο όγκος των δεδομένων και αποτελεσμάτων.
- Το προτεινόμενο διαχειριστικό εργαλείο θα μπορούσε να ενσωματωθεί σε ένα ευρύτερο μοντέλο λήψης απόφασης, σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, για την παραστατικότερη απεικόνιση και σύγκριση των αποτελεσμάτων των στρατηγικών διαχείρισης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η οικονομική στήριξη της ερευνητικής εργασίας πραγματοποιήθηκε από τα κάτωθι ερευνητικά προγράμματα:

Ανάπτυξη ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης και διαχείρισης ποσότητας και ποιότητας υδατικών πόρων αγροτικών λεκανών απορροής υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής. Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κάρλας, που συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης - ΕΤΠΑ) και από εθνικούς πόρους, μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ & ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ» ΚΑΙ «ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΩΝ ΣΕ ΜΕΤΑΒΑΣΗ» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ 2007-2013) - Δράση Εθνικής Εμβέλειας – Συνεργασία 2009 – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο «ΥΔΡΟΜΕΝΤΩΡ»

Αειφορική χρήση αρδευτικού νερού στη Μεσόγειο - Sustainable use of irrigation water in the Mediterranean region (SIRRIMED), που χρηματοδοτήθηκε από το 7^ο Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Πλαίσιο (FP7-KBBE-2009-3) στον «Τομέα Τρόφιμα, Αλιεία και Βιοτεχνολογία».

BRINGING the OpenMI to LIFE : Εφαρμογή Ενιαίων Ομοιομάτων για Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων, που χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση.

Αρχιμήδης ΙΙΙ - Ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης, προσομοίωσης και διαχείρισης υδατικών πόρων με περιβαλλοντική και κοινωνικοοικονομική δυναμική - Εφαρμογή του συστήματος στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κάρλας, που χρηματοδοτήθηκε από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

N. Mylopoulos. and P. Sidiropoulos, (2007). «Uncertainty analysis and management in an overexploited aquifer», International Conference ModeICARE 2007 Copenhagen.

N. Mylopoulos, P. Sidiropoulos, A. Loukas (2008). «A coupled surface hydrology-lake-groundwater modeling and management framework under hydrogeologic uncertainty», IAHR International Groundwater Symposium: Flow and Transport in Heterogeneous Subsurface Formations: Theory, Modelling & Applications, Istanbul, Turkey.

Σιδηρόπουλος, Π. (2008). «Στοχαστική Προσομοίωση του Υπόγειου Υδροφορέα της Λίμνης Κάρλας», 2η Συνάντηση Υποψηφίων Διδασκτόρων & Μεταπτυχιακών Φοιτητών του Δικτύου "υδροΜΕΔΩΝ", Βόλος .

P. Sidiropoulos, S. Folia, N. Mylopoulos and A. Loukas, (2008). «A coupled surface hydrology-lake-groundwater modeling framework for the lake karla basin», PRE9: Protection and Restoration of the Environment, Kefalonia, Greece.

N. Mylopoulos, P. Sidiropoulos (2008). «Groundwater management under hydrogeologic uncertainty in an overexploited aquifer », 33rd International Geological Congress, Oslo, Norway.

A. Loukas, N. Mylopoulos, K. Kokkinos, P. Sidiropoulos, L. Vasiliades and A. Liakopoulos (2008). The effect of spatial discretization in integrated modeling of surface and groundwater hydrology through OpenMI», International Interdisciplinary Conference on Predictions for Hydrology, Ecology and Water Resources Management – Using Data and Models to Benefit Society, Prague, Czech Republic.

N. Mylopoulos, A. Loukas, P. Sidiropoulos and S. Folia, (2008). «Conjunctive use of surface hydrology, lake and groundwater models for the management of an overexploited aquifer», International Interdisciplinary Conference on Predictions for Hydrology, Ecology and Water Resources Management – Using Data and Models to Benefit Society, Prague, Czech Republic.

N. Mylopoulos, A. Loukas, P. Sidiropoulos and S. Folia, (2008). « Conjunctive use of surface hydrology, lake and groundwater models for the management of an overexploited aquifer », International Interdisciplinary Conference on Predictions for Hydrology, Ecology and Water Resources Management – Using Data and Models to Benefit Society, Prague, Czech Republic.

P. Sidiropoulos, A. Loukas, N. Mylopoulos and L. Vasiliades (2009). « Integrated OpenMI Modelling and Management of Lake Karla Aquifer under Climate Change », European Geosciences Union General Assembly 2009, Vienna, Austria.

K. Kokkinos, P. Sidiropoulos, L. Vasiliades, A. Loukas, N. Mylopoulos and A. Liakopoulos (2009). «Integrated modeling of surface water and groundwater through OpenMI: The case of lake Karla», 2nd International Multidisciplinary Conference on Hydrology and Ecology, Vienna, Austria.

N. Mylopoulos and P. Sidiropoulos, (2009). «Groundwater management under hydrogeologic

uncertainty in an overexploited aquifer», Global Groundwater Resources and Management: Selected Papers from International Geological Congress Oslo (Norway), 2008 Editor B.S. Paliwal, Publisher: «Scientific Publishers (India)».

Π. Σιδηρόπουλος, Ν. Μυλόπουλος και Λουκάς Α. (2009). «Προσομοίωση της επίδρασης των νέων υδρευτικών γεωτρήσεων στον υδροφορέα της Κάρλας», Κοινό Συνέδριο: 11^ο της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (EYE), 7^ο της Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ), Βόλος, Ελλάδα.

A. Loukas, S. Folia, P. Sidiropoulos and N. Mylopoulos, (2010). «Implications of surface hydrology modeling uncertainty on groundwater simulation», PRE10: Protection and Restoration of the Environment, Corfu, Greece, 5-9 July 2010.

P. Sidiropoulos, N. Mylopoulos and A. Loukas (2010). « A Joint Surface Hydrology-Lake-Groundwater Modeling and Management Framework». 5th IAHR International Groundwater Symposium 2010, Valencia, Spain, 22-24 September 2010.

N. Mylopoulos, A. Loukas, P. Sidiropoulos and L. Vasiliades (2010). «Integrated OpenMI Modeling of a Surface Water – Lake - Groundwater system and a management framework of the overexploited aquifer under Climate Change», A.G.U. Fall Meeting, San Francisco, USA, 13-17 December 2010.

P. Sidiropoulos, A. Loukas and N. Mylopoulos (2011). «Optimal Groundwater Resources Management of an overexploited aquifer under global change», VI EWRA International Symposium - Water Engineering and Management in a Changing Environment, Catania, Italy, June 29 - July 2 2011.

Π. Σιδηρόπουλος (2011). «Η αξία της πληροφορίας της υδραυλικής αγωγιμότητας στην στοχαστική βελτιστοποίηση της διαχείρισης του υπόγειου υδροφορέα της Λίμνης Κάρλας», 3η Συνάντηση Υποψηφίων Διδασκτόρων & Μεταπτυχιακών Φοιτητών του Δικτύου "υδροΜΕΔΩΝ", Αθήνα.

A. Loukas, S. Folia, P. Sidiropoulos and N. Mylopoulos (2012). «Analysis of Groundwater Simulation Uncertainty Due to Surface Hydrology Model Parameter Uncertainty and Precipitation Errors. PRE11: Protection and Restoration of the Environment», Thessaloniki, Greece, 3-6 July 2012.

Π. Σιδηρόπουλος, Ν. Μυλόπουλος, Α. Λουκάς και Α. Βασιλειάδης (2012). «Αειφορική και ολοκληρωμένη διαχείριση του υπόγειου υδροφορέα της λίμνης Κάρλας με τη λειτουργία του ταμιευτήρα», 1^ο Περιβαλλοντικό Συνέδριο Θεσσαλίας, Σκιάθος, Ελλάδα, 8-10 Σεπτεμβρίου 2012.

Π. Σιδηρόπουλος και Ν. Μυλόπουλος (2012). «Στοχαστική βελτιστοποίηση σε υδροφορέα υπό καθεστώς υπερ-εκμετάλλευσης: Η περίπτωση της λίμνης Κάρλας», 2^ο Κοινό Συνέδριο: 12^ο της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (EYE), 8^ο της Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ), Πάτρα, Ελλάδα, 11-13 Οκτωβρίου 2012.

P. Sidiropoulos and N. Mylopoulos (2012). «A stochastic optimization framework for the evaluation of hydraulic conductivity uncertainty on the sustainable management of an over-exploited aquifer». 6th IAHR International Groundwater Symposium, Kuwait, Kuwait, 19-21 November 2012.

- P. Sidiropoulos, Th. Papadimitriou, Z. Stabouli, A. Loukas, N. Mylopoulos and If. Kagalou (2012). «Past, present and future concepts for conservation of the re-constructed lake Karla (Thessaly- Greece)», *Fresenius Environmental Bulletin*, 21:10a.2012.
- P. Sidiropoulos, N. Mylopoulos and A. Loukas (2013). «Optimal management of an overexploited aquifer under climate change: The Lake Karla case», *Journal of Water Resources Management*, 27(6):1635-1649. doi: 10.1007/s11269-012-0083-4.
- P. Sidiropoulos and N. Mylopoulos (2014). «The value of hydraulic conductivity information for the optimal restoration of an over-xploited aquifer». 7th IAHR International Groundwater Symposium, Perugia, Italy, 22-24 September 2014.
- P. Sidiropoulos, N. Mylopoulos and A. Loukas (2014). « Stochastic integrated modeling and management of an over-exploite aquifer under a restoration plam in a dried lake basin», *Journal of Water Resources Management* (Accepted for publication).
- N. Mylopoulos and P. Sidiropoulos (2014). « A stochastic optimization framework for the restoration of an over-exploited aquifer», *Hydrological Sciences Journal (Υπό Κρίση)*

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ababou, R., McLaughlin, D., Gelhar, L.G. and Tompson, A.F.B. (1989). Numerical simulation of three-dimensional saturated flow in randomly heterogeneous porous media. *Transport in Porous Media*, 4(6):549-565. doi: 10.1007/BF00223627.
- Abbaspour, K.C., Schulin, R., Schlappi, E. and Fluhler, H. (1996). A Bayesian approach for incorporating uncertainty and data worth in environmental projects. *Environmental Modeling & Assessment*, 1(3):151-158. doi: 10.1007/BF01874902.
- Ahlfeld, D.P and Mulligan, A.E. (2000) *Optimal Management of Flow in Groundwater Systems*, Academic Press, San Diego, CA.
- Ahlfeld, D.P. and Riefler, G. (2003). *Documentation for MODOFC—A program for solving optimal flow control problems based on MODFLOW simulation, version 2.3.*, Master's Thesis, University of Massachusetts, Amherst.
- Ahlfeld, D.P. and Baro-Montes, G. (2008). Solving unconfined groundwater flow management problems with successive linear programming. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 134(5):404-412. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:5(404).
- Ahlfeld, D.P. and Baro-Montes, Gemma, (2008). Solving unconfined groundwater flow management problems with successive linear programming. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(5):404-412. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:5(404)
- Ahlfeld, D.P. and Heidari, M. (1994). Applications of optimal hydraulic control to groundwater systems. *Journal Of Water Resources and Planning Management, ASCE*, 120(3): 350–365. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:3(350).
- Ahlfeld, D.P., Barlow, P.M. and Mulligan, A.E. (2005). *GWM—A ground-water management process for the U.S. Geological Survey modular ground-water model (MODFLOW-2000)*, U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1072, Denver.
- Ajami, N.K., Duan, Q.Y. and Sorooshian, S. (2007). An integrated hydrologic Bayesian multimodel combination framework: Confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction. *Water Resources Research*, 43:W01403. doi: 10.1029/2005WR004745.
- Ananiadis, C.I. (1956). Limnology study of lake Karla. *Bulletin de l'Institut Océanographique*, 1083:1–19.
- Ang, A.H.S. and Tang, W.H. (1984). *Probabbility concepts in engineering planning and design, Volume 2. Decision, Risk and Reliability*. J. Wiley and Sons. New York.
- Ayvaz, T.M. and Elci, A. (2013). A groundwater management tool for solving the pumping cost minimization problem for the Tahtali watershed (Izmir-Turkey) using hybrid HS-Solver optimization algorithm. *Journal of Hydrology*, 478(63-76). doi: http:10.1016/j.jhydrol.2012.11.045.
- Baecher, G.B. (1972). Site exploration: A probabilistic approach. Ph.D. Thesis, M.I.T., Massachusetts.
- Bakr, A.A., Gelhar, L.W., Gutjahr, A.L. and MacMillan, J. R. (1978). Stochastic analysis of spatial variability in subsurface flows: 1. Comparison of one- and three-dimensional flows. *Water Resources Research*, 14(2):263–271, doi:10.1029/WR014i002p00263.

- Banta, E. R. and Paschke, S. S. (2012). *Demonstration optimization analyses of pumping from selected Arapahoe aquifer municipal wells in the west-central Denver Basin, Colorado, 2010–2109*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2012–5140, 37 p. <http://pubs.usgs.gov/sir/2012/5140/>
- Banta, E.R., Paschke, S.S. and Litke, D.W. (2011). *Groundwater flow simulations of the Denver Basin aquifer system*. Chapter C of Paschke, S.S., ed., *Groundwater availability of the Denver Basin aquifer system*, Colorado: U.S. Geological Survey Professional Paper 1770, p. 181–274.
- Barlow, P.M., Wagner, B.J. and Belitz, K. (1996). Pumping Strategies for Management of a Shallow Water Table: The Value of the Simulation-Optimization Approach. *Ground Water*, **34**: 305–317. doi: 10.1111/j.1745-6584.1996.tb01890.x
- Bau, D.A. and Mayer, A.S. (2007). Data-worth analysis for multiobjective optimal design of pump-and-treat remediation systems. *Advances in Water Resources*, **30**(8):1815-1830. doi: 10.1016/j.advwatres.2007.02.008.
- Beck, N.B. (1983) Uncertainty, System Identification, and the Prediction of Water Quality. In: Beck, N.B. & van Straten, G. (Eds), *Uncertainty and Forecasting of Water Quality*, pp 3-68. Springer, Berlin.
- Beckie, R. (1996). Measurement Scale, Network Sampling Scale, and Groundwater Model Parameters. *Water Resources Research*, **32**(1):65–76. doi:10.1029/95WR02921.
- Ben-Zvi, M., Berkowitz, B. and Kesler, S. (1988). Pre-posterior analysis as a tool for data evaluation: application to aquifer contamination. *Water Resources Management*, **2**(1):11–20. doi:10.1007/BF00421927.
- Bernier, J.M. (1987) Elements of Bayesian analysis of uncertainty in hydrological reliability and risk models. In: Duckstein, L. & Plate, E.J. (Eds.), *Engineering Reliability and Risk in Water Resources*, NATO ASI Series, Series E: Applied Sci., No. 124, Nijhoff Dordrecht.
- Bierkens, M.F.P. and Van Geer, F. (2008). *Stochastic Hydrology*. Report GEO4-4420, Utrecht University, Utrecht.
- Borisova, T., Shortle, J., Horan, R. D. and Abler, D. (2005). Value of information for water quality management. *Water Resources Research*, **41**:W06004. doi:10.1029/2004WR003576.
- Bouwer, H. (1969). Planning and Interpreting Soil Permeability Measurements. *Journal of the Irrigation and Drainage Division of the A.S.C.E.*, **3**:391-402.
- Bredehoeft, J. (2005). The conceptualization model problem—surprise. *Hydrogeology Journal*, **13**(1):37-46. doi: 10.1007/s10040-004-0430-5.
- Bredehoeft, J.D. and Young, R.A. (1983). Conjunctive use of groundwater and surface water for irrigated agriculture: Risk aversion, *Water Resources Research*, **19**(5):1111–1121, doi:10.1029/WR019i005p01111.
- Brunner, J.K. (1980). Piecewise linear optimization. *Computing*, **25**(1):59-76. doi: 10.1007/BF02243882.
- Carle, S.F. (1996). *A transition probability-based approach to geostatistical characterization of hydrostratigraphic architecture*. Ph.D. Dissertation, University of California, Davis.
- Christodoulaki, S., Loukas, A., Vasiliades, L. and Dalezios, N.R. (2003). Water Balance Modeling Using Digital Gis Data. *International Symposium «GIS and Remote Sensing: Environmental Applications»*, 7-9 November, Volos.
- Christodoulaki, S., Loukas, A., Vasiliades, L. and Dalezios, N.R. (2004). Analysis of Water Balances and Demands in Heraklio Watersheds, Crete. *7th International Conference of Protection and Restoration of the Environment*, 28 June - 1 July, Mykonos.
- Dagan, G. (1989). *Flow and transport in porous formations*. Springer-Verlag, Berlin.

- Dagan, G. (2002). An overview of stochastic modeling of groundwater flow and transport: From theory to applications, *Eos Transactions AGU*, **83**(53):621–625. doi:10.1029/2002EO000421.
- Das, A. and Datta, B. (2001). Application of optimisation techniques in groundwater quantity and quality management. *Sadhana*, **26**(4):293–316. doi: 10.1007/BF02703402.
- Dausman, A. M., Doherty, J., Langevin, C. D. and Sukop, M. C. (2010). Quantifying Data Worth Toward Reducing Predictive Uncertainty. *Ground Water*, **48**(5):729–740. doi: 10.1111/j.1745-6584.2010.00679.x.
- Davidon, W.C. (1959). Variable metric method for minimization, A.E.C. Research and Development, Report. ANL-5990, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois.
- Davis, D.R. and Dvoranchik, W.M. (1971). Evaluation of the worth of additional data. *Water Resources Bulletin*, **7**(4):700–707. doi: 10.1111/j.1752-1688.1971.tb04981.x.
- Delhomme, J.P. and de Marsily, G. (2006). *Flow in porous media: An attempt to outline Georges Matheron's contributions*. In Space, Structure and Randomness: Contributions in Honor of Georges Matheron in the Fields of Geostatistics, Random Sets and Mathematical Morphology . Lecture Notes in Statistics, ed. M. Bilodeau, F. Meyer, and M. Schmitt. Berlin, Springer, Germany.
- Delhomme, J.P. (1979). Spatial variability and uncertainty in groundwater flow parameters: A geostatistical approach. *Water Resources Research*, **15**(2):269–280, doi:10.1029/WR015i002p00269.
- Deninger, R.A. (1970). Systems analysis of water supply systems, *Water Resources Bulletin*, **6**(4):573–579. doi: 10.1111/j.1752-1688.1970.tb00518.x.
- Dettinger, M.D. and Wilson, J.L. (1981). First order analysis of uncertainty in numerical models of groundwater flow part: 1. Mathematical development, *Water Resources Research*, **17**(1):149–161. doi:10.1029/WR017i001p00149.
- Deutsch C.V. and Journel, A.G. (1997). *Geostatistical Software Library and User's Guide 2nd Edition*. Oxford University Press, USA.
- Draper, D. (1995) Assessment and propagation of model uncertainty. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, **57**(1): 45–97. Διαθέσιμο στο url: <http://www.jstor.org/stable/2346087>.
- Eckhardt, R. (1987). Stan Ulam, John von Neumann, and the Monte Carlo method, *Los Alamos Science: Los Alamos National Laboratory*, **15**:131–137.
- Fafoutis, C., Mylopoulos, N., Mpaltas, N. and Seimenis, M. (2001). Economic value of water in agriculture: Application in Lake Karla, Greece. *VI EWRA International Symposium Water Engineering and Management in a Changing Environment*, 29 June – 2 July, Catania.
- Feinerman, E., Bresler, E. and Dagan, G. (1985). Optimization of a Spatially Variable Resource: An Illustration for Irrigated Crops, *Water Resources Research*, **21**(6):793–800. doi:10.1029/WR021i006p00793.
- Feyen, L. and Gorelick, S.M. (2005). Framework to evaluate the worth of hydraulic conductivity data for optimal groundwater resources management in ecologically sensitive areas. *Water Resources Research*, **41**:W03019. doi:10.1029/2003WR002901.
- Feyen, L. and Gorelick S. M. (2004). Reliable groundwater management in hydroecologically sensitive areas, *Water Resources Research*, **40**:W07408, doi:10.1029/2003WR003003.
- Feyen, L. and S. M. Gorelick (2005). Framework to evaluate the worth of hydraulic conductivity data for optimal groundwater resources management in ecologically sensitive areas, *Water Resources Research*, **41**:W03019, doi:10.1029/2003WR002901.

- Fletcher, R. (1972). *Minimizing general functions subject to linear constraints*. In: Numerical methods for nonlinear optimization. F.A. Lootsma (ed.), Academic Press, London and New York.
- Foglia, L., Mehl, S.W. and Hill, M.C. (2013). et al. Evaluating model structure adequacy: The case of the maggia valley groundwater system, southern switzerland. *Water Resources Research*, **49**(1):260–282. doi: 10.1029/2011WR011779.
- Freeze, R.A. (1975). A stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media. *Water Resources Research*, **11**(5):725-741. doi: 10.1029/WR011i005p00725.
- Freeze, R.A. and Gorelick, S.M. (1999). Convergence of stochastic optimization and decision analysis in the engineering design of aquifer remediation. *Ground Water*, **37**(6):934-954. doi: 10.1111/j.1745-6584.1999.tb01193.x.
- Freeze, R.A., James, B., Massmann, J., Sperling, T. and Smith, L. (1992). Hydrogeological Decision Analysis: 4. The Concept of Data Worth and Its Use in the Development of Site Investigation Strategies. *Ground Water*, **30**(4): 574–588. doi: 10.1111/j.1745-6584.1992.tb01534.x
- Freeze, R.A., Massmann, J., Smith, L., Sperling, T. and James, B. (1990). Hydrogeological Decision Analysis: 1. A Framework. *Ground Water*, **28**:738–766. doi: 10.1111/j.1745-6584.1990.tb01989.x
- Gates, J.S. and Kisiel C.C. (1974). Worth of additional data to a digital computer model of a groundwater basin. *Water Resources Research*, **10**(5):1031–1038. doi:10.1029/WR010i005p01031.
- Gelhar, L.W. (1984). Stochastic analysis of flow in heterogeneous media. In Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media, edited by Bear, J. and Copapcioglu, Y. *NATO Advanced Study Institute Series*, **82**:673-717. doi: 10.1007/978-94-009-6175-3_14.
- Gelhar, L.W. (1993). *Stochastic Subsurface Hydrology*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, N.J..
- Gelhar, L.W. and Axness, C.L. (1983). Three-dimensional stochastic analysis of macrodispersion in aquifers. *Water Resources Research*, **19**(1):161–180. doi:10.1029/WR019i001p00161.
- Gelhar, L.W. (1974). Stochastic analysis of phreatic aquifers. *Water Resources Research*, **10**(3):539–545, doi:10.1029/WR010i003p00539.
- Gelhar, L.W. (1986). Stochastic subsurface hydrology from theory to applications, *Water Resources Research*, **22**(9S):135–145. doi:10.1029/WR022i09Sp0135S.
- Gelhar, L.W., Bakr, A.A., Gutjahr, A.L. and MacMillan, J.R. (1977). Comments on ‘Stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media’ by R. Allan Freeze, *Water Resources Research*, **13**(2):477–479. doi:10.1029/WR013i002p00477.
- Gill, P.E., Murray, W. and Wright, M.H. (1981). *Practical optimization*. Academic Press, London.
- Gill, P.E., Murray, W. and Wright, M.H. (1981). *Practical optimization*. Academic Press, New York.
- Gill, P.E., Murray, W., Saunders, M.A. and Wright, M.H. (1980). *User’s guide for NPSOL* (Version 4.0): A Fortran package for nonlinear programming, Technological Report SOL 86-2. Department of Operation Research, Stanford.
- Gillham, R.W. and Farvolden, R.N. (1974). Sensitivity analysis of input parameters in numerical modeling of steady state regional groundwater flow. *Water Resources Research*, **10**(3):529–538. doi:10.1029/WR010i003p00529.

- Gillham, R.W. and Farvolden, R.N. (1974). Sensitivity analysis of input parameters in numerical modeling of steady state regional groundwater flow. *Water Resources Research*, **10**(3):529–538. doi:10.1029/WR010i003p00529.
- Gómez-Hernández, J.J. and Gorelick, S.M. (1989). Effective groundwater model parameter values: Influence of spatial variability of hydraulic conductivity, leakance, and recharge. *Water Resources Research*, **25**(3):405–419. doi:10.1029/WR025i003p00405.
- Gorelick, S.M. (1983). A review of distributed parameter groundwater management modeling methods. *Water Resources Research*, **19**(2):305–319. doi: 10.1029/WR019i002p00305.
- Gorokhovich, Y., Mays, L.W. and Ullmann, L. (2011). A survey of ancient minoan water technologies, water science and technology. *Water supply*, **11**(4):388–399. doi:10.2166/ws.2011.072.
- Gould, J.P. (1974). Risk, stochastic preference, and the value of information. *Journal of Economic Theory*, **8**(1):64–84. doi:10.1016/0022-0531(74)90006-4.
- Graham, W. and McLaughlin, D. (1989). Stochastic analysis of nonstationary subsurface solute transport: 1. Unconditional moments, *Water Resources Research*, **25**(2):215–232. doi:10.1029/WR025i002p00215.
- Graham, W.D. and McLaughlin, D.B. (1991). A stochastic model of solute transport in groundwater: Application to the Borden, Ontario, Tracer Test. *Water Resources Research*, **27**(6):1345–1359, doi:10.1029/91WR00260.
- Grosser, P.W. and Goodman, A.S. (1985). Determination of groundwater sampling frequencies through Bayesian decision theory. *Civil Engineering Systems*, **2**(4):186–194. doi: 10.1080/02630258508970405.
- Gutjahr, A.L. and Gelhar, L.W. (1981). Stochastic models of subsurface flow: infinite versus finite domains and stationarity. *Water Resources Research*, **17**(2):337–350. doi:10.1029/WR017i002p00337.
- Gutjahr, A.L., Gelhar, L.W., Bakr, A.A. and MacMillan, J.R. (1978). Stochastic analysis of spatial variability in subsurface flows: 2. Evaluation and application. *Water Resources Research*, **14**(5):953–959. doi:10.1029/WR014i005p00953.
- Halford, K.J. and Hanson, R.T. (2002). *User guide for the drawdown-limited, multi-node well (MNW) package for the U.S. Geological Survey's modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, versions MODFLOW-96 and MODFLOW-2000*. U.S. Geological Survey Open-File Report 02-293, Sacramento.
- Hall, W. and Dracup, I. (1970). *Water Resources Systems Engineering*. McGraw-Hill, London.
- Hantush, M.S. (1964). *Advances in Hydrosience V*. Academic Press, New York.
- Harbaugh, A.L. and McDonald, M.G. (2000). *User's Documentation for MODFLOW-2000, an update to the U.S. Geological Survey Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model*. United States Government Printing Office, Washington.
- Harbaugh, A.W. and McDonald, M.G. (1996). *Programmer's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model*. U.S. Geological Survey Open-File Report 96-486, Reston.
- Hassan, A.E., Bekhit, H.M. and Chapman, J.B. (2008). Uncertainty assessment of a stochastic groundwater flow model using GLUE analysis. *Journal of Hydrology*, **362**(1-2):89–109. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.08.017.
- Hassan, A.E., Bekhit, H.M. and Chapman, J.B. (2009). Using Markov Chain Monte Carlo to quantify parameter uncertainty and its effect on predictions of a groundwater flow model. *Environmental Modelling & Software*, **24**(6):749–763. doi: 10.1016/j.envsoft.2008.11.002.

- Heidari, M. (1982). Application of linear systems theory and linear programming to groundwater management in Kansas. *Water Resources Bulletin*, **18**:1003–1012. doi: 10.1111/j.1752-1688.1982.tb00108.x
- Howard, R.A. (1966). Information value theory, *IEEE Transactions, Systems Science Cybernetics*, **2**(1):22–26. doi:10.1109/TSSC.1966.300074.
- Jacob, C.E. (1944). *Notes on determining permeability by pumping tests under water-table conditions*, U.S. Geol. Survey Open-File Report.
- James, B., Gwo, J. and Toran, L. (1996). Risk-Cost Decision Framework for Aquifer Remediation Design. *Water Resources Planning and Management*, **122**(6), 414–420. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:6(414).
- James, B.R. and Freeze, R.A. (1993). The worth of data in predicting aquitard continuity in hydrogeological design, *Water Resources Research*, **29**(7):2049–2065. doi:10.1029/93WR00547.
- James, B.R. and Gorelick, S.M. (1994). When enough is enough: The worth of monitoring data in aquifer remediation design, *Water Resources Research*, **30**(12):3499–3513. doi:10.1029/94WR01972.
- Jin, X., Xu, C.Y., Zang, Q. and Singh, V.P. (2010). Parameter and modeling uncertainty simulated by GLUE and a formal Bayesian method for a conceptual hydrological model. *Journal of Hydrology*, **383**(3-4):14-155). doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.12.028.
- Karash, R. (1962). *Quadratic programming system (QPS) applications program manual*, APM-23, MIT Info. Processing Center, Cambridge.
- Karatzas, G.P. and Pinder, G.F. (1996). The solution of groundwater quality management problems with a nonconvex feasible region using a cutting plane optimisation technique. *Water Resources Research*, **32**:1091–1100. Doi: 10.1029/95WR03812.
- Karterakis, S.M., Karatzas, G.P., Nikolos, I.K. and Papadopoulou, M.P. (2007). Application of linear programming and differential evolutionary optimization methodologies for the solution of coastal subsurface water management problems subject to environmental criteria. *Journal of Hydrology*, **342**:270-282. doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.05.027
- Kass, R.E and Raftery, A.E. (1995). Bayes factors. *Journal of the American Statistical Association*, **90**(430):773–795. doi: 10.1080/01621459.1995.10476572.
- Kavetski, D., Kuczera, G. and Franks, S.W. (2006a). Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modelling. I. Theory. *Water Resources Research*, **42**:W03407. doi:10.1029/2005WR004368.
- Kavetski, D., Kuczera, G. and Franks, S.W. (2006b). Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modelling. II. Application. *Water Resources Research*, **42**:W03408. doi:10.1029/2005WR004376.
- Knight, C.G., Chang, H., Staneva, M.P. and Kostov, D. (2001). A simplified basin model for simulating runoff: The Struma River GIS. *Professional Geographer*, **53**(4):533-545. doi: 10.1111/0033-0124.00303.
- Krige, D.G. (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand". *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, **52**(6):119–139. doi: 10.2307/3006914.
- Krzysztofowicz R. Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model. *Water Resources Research*, **35**(9):2739–2750. doi: 10.1029/1999WR900099.
- Kundzewicz, Z.W. (1995). Hydrological uncertainty in perspective. In: Kundzewicz, Z.W. (ed.), *New Uncertainty Concepts in Hydrology and Water Resources*, Cambridge University Press, Cambridge.

- Larson, S.P., Maddock, III, T. and Papadopoulos, S. (1977). Optimization techniques applied to groundwater development, Mere. Int. Assoc. Hydrogeol., **13**:E57-E67.
- Lee, A.S. and Aronafsky, J.S. (1958) A linear programming model for scheduling crude oil production. *Journal Of Petroleum Technology*, **213**:51–54. doi: 10.2118/862-G.
- Lindley, D.V. (1985) *Making Decisions (Second Edition)*. John Wiley and Sons, London.
- Liu, J., Zheng, C., Zheng, L. and Lei, Y. (2008). Ground Water Sustainability: Methodology and Application to the North China Plain. *Ground Water*, **46**: 897–909. doi: 10.1111/j.1745-6584.2008.00486.x
- Liu, P.G. and Shu, L.C. (2008). Uncertainty on numerical simulation of groundwater flow in the riverside well field. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, **38**:639–644.
- Liu, X., Lee, J., Kitanidis, P.K., Parker, J. and Kim, U. (2012). Value of Information as a Context-Specific Measure of Uncertainty in Groundwater Remediation. *Water Resources Management*. **26**(6):1513-1535. doi: 10.1007/s11269-011-9970-3.
- Loukas, A., Mylopoulos, N. and Vasiliades, L. (2007). A Modelling System for the Evaluation of Water Resources Management Scenarios in Thessaly, Greece. *Water Resources Management*, **21**:1673 – 1702.
- Loukas, A., Mylopoulos, N., Kokkinos, K., Sidiropoulos, P., Vasiliades, L. and Liakopoulos, A. (2008a). The Effect of Spatial Discretization in Integrated Modeling of Surface and Groundwater Hydrology through OpenMI. *Hydropredict 2008 International Interdisciplinary Conference*, 15-18 September, Prague.
- Loukas, A., Vasiliades, L. and Lachanas, G. (2006). Climate Change Impacts on the Components of Hydrological Cycle in Thessaly. *8th International Conference of Protection and Restoration of the Environment*, 3- 7 July 2006, Chania.
- Ma, H.W. and Chang, C.C. (2008). Assessment of the value of reducing uncertainty by sampling in a groundwater remediation system. *Science of The Total Environment*, **1**(25):9-17. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.04.034.
- Maddock, III, T. (1972a). Algebraic technological function from a simulation model, *Water Resources Research*, **8**(1):129-134. doi: 10.1029/WR008i001p00129.
- Maddock, III, T. (1972b). A ground-water planning model: A basis for a data collection network. Paper presented at the *International Symposium on Uncertainties in Hydrologic and Water Resource Systems*, Int. Assoc. Sci. Hydrol., Univ. of Ariz., Tuscon.
- Maddock, III, T. (1973). Management model as a tool for studying the worth of data. *Water Resources Research*, **9**(2):270–280. doi:10.1029/WR009i002p00270.
- Marin, C.M., Medina, M.A., Jr. and Butcher, J.B. (1989). Monte Carlo analysis and Bayesian decision theory for assessing the effects of waste sites on groundwater, I: theory. *Journal of Contaminant Hydrology*, **5**(1):1-13. doi: 10.1016/0169-7722(89)90002-8.
- Massmann, J., Freeze, R.A., Smith, L., Sperling, T. and James, B. (1991). Hydrogeological Decision Analysis: 2. Applications to Ground-Water Contamination. *Ground Water*, **29**: 536–548. doi: 10.1111/j.1745-6584.1991.tb00545.x
- Matheron, G. (1962). *Traité de géostatistique appliquée*. Editions Technip, France.
- Matheron, G. (1967). *Elements pour une Theorie des Mlieux Poreux*. Masson et Cie, Paris. (In French).
- Mays, L. (1996). *Water Resources*. McGraw-Hill, New York
- Mays, L.W. (2011). *Ancient water technologies*. Springer, Dordrecht.
- Mc Carthy, J. (1956). Measures of the value of information. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **42**(9):654-655. doi: 10.2307/89735.

- Medina, M.A., Jr., Butcher, J.B. and Marin, C.M. (1989). Monte Carlo analysis and Bayesian decision theory for assessing the effects of waste sites on groundwater, II: Applications. *Journal of Contaminant Hydrology*, **5**(1):15-31. doi: 10.1016/0169-7722(89)90003-X.
- Merritt, M.L. and Konikow, L.F. (2000). *Documentation of a Computer Program to Simulate Lake-Aquifer Interaction Using the MODFLOW Ground-Water Flow Model and the MOC3D Solute-Transport Model*. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 00-4167, USA.
- Merz, B. and Thielen, A.H. (2009). Flood risk curves and uncertainty bounds. *Natural Hazards*, **51**(3):437-458. doi: 10.1007/s11069-009-9452-6.
- Metropolis, N.C. (1987). The beginning of the Monte Carlo method, Los Alamos Science, Los Alamos National Laboratory, **15**:125-130. Διαθέσιμο στο url: <http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?15-02.pdf>
- Minihane, M.R. (2002). *Stream-aquifer interactions and a water supply management model*. Master's Thesis, University of Massachusetts, Amherst.
- Montana, A. (2007). What do we mean by 'uncertainty'? The need for a consistent wording about uncertainty assessment in hydrology. *Hydrological Processes*, **21**:841-845. doi: 10.1002/hyp.6623.
- Mylopoulos, Y., Latinopoulos and Tolikas, D. (1988). A dimensionless analysis in the optimal management of groundwater pollutant sources. *Water Resources Management*, **2**(2):103-121. doi: 10.1007/BF00577063.
- Neuman, S.P. (1984). *Role of geostatistics in subsurface hydrology*. In Geostatistics for Natural Resources Characterization, Part 2, edited by Verly, G., David, M., Journel, A.G. and Marechal, A., D. Reidel Publishing Co, The Netherlands.
- Neuman, S.P. and Wierenga, P.J. (2003). *A comprehensive strategy of hydrogeologic modeling and uncertainty analysis for nuclear facilities and sites*. NUREG/CR-6805, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC.
- Noetinger, B., Artus, V. and Zargar, G. (2005). The future of stochastic and upscaling methods in hydrogeology. *Journal of hydrogeology*, **13**(1):184-201. doi: 10.1007/s10040-004-0427-0
- Noetinger, B., Artus, V. and Zargar, G. (2005). The future of stochastic and upscaling methods in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, **13**(1):184-201. doi: 10.1007/s10040-004-0427-0.
- Norberg, T. and Rosén, L. (2006). Calculating the optimal number of contaminant samples by means of data worth analysis. *Environmetrics*, **17**(7): 705–719. doi: 10.1002/env.787
- Palacios-Gomez, F., Lasdon, L. and Enquist, M. (1982). Nonlinear Optimization by Successive Linear Programming. *Management Science*, **28**(10):1106-1120. doi: 10.1287/mnsc.28.10.1106.
- Peck, A.S., Gorelick, S., de Marsily, G., Foster, S. and Kovaleksy, V. (1988). *Consequences of spatial variability in aquifer properties and data limitations for groundwater modeling practice*. International Association of Hydrological Sciences, Oxfordshire.
- Peralta, R.C., Azarmnia, H. and Takahashi, S. (1991). Embedding and Response Matrix Techniques for Maximizing Steady-State Ground-Water Extraction: Computational Comparison. *Ground Water*, **29**:357–364. doi: 10.1111/j.1745-6584.1991.tb00526.x
- Pisinaras, V., Petalas, C., Tsihrintzis, V.A. and Karatzas, G.P. (2013). Integrated modeling as a decision-aiding tool for groundwater management in a Mediterranean agricultural watershed. *Hydrological Processes*, **27**:1973-1987. doi: 10.1002/hyp.9331.
- Post, J., Hattermann, F.F., Krysanova, V. and Suckow, F. (2008). Parameter and input data uncertainty estimation for the assessment of long-term soil organic carbon dynamics. *Environmental Modelling & Software*, **23**(2):125–138. doi: 10.1016/j.envsoft.2007.05.010.

- Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A. and Vetterling, W.T. (1986). *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Psilovikos, A. (1999a). Optimization models in groundwater management, based on linear and mixed integer programming. An application to a Greek Hydrogeological basin. *Physics and Chemistry of the Earth Part B*, **24**(1–2), 139–144. doi: 10.1016/S1464-1909(98)00025-2.
- Psilovikos, A. (2006). Response Matrix Minimization Used in Groundwater Management with Mathematical Programming: A Case Study in a Transboundary Aquifer in Northern Greece. *Water Resources Management*, **20**(2): 277–290. doi: 10.1007/s11269-006-0324-5.
- Raftery, A.E., Gneiting, T., Balabdaoui, F. and Polakowski, M. (2005). Using Bayesian Model Averaging to Calibrate Forecast Ensembles. *Monthly Weather Review*, **133**(5):1155–1174. doi: 10.1175/MWR2906.1.
- Rastogi, A.K. (1989). Optimal pumping policy and groundwater balance for the Blue Lake aquifer, California, involving nonlinear groundwater hydraulics. *Journal of Hydrology*, **111**:177–194. doi: 10.1016/0022-1694(89)90259-X.
- Refsgaard, J.C., Christensen, S., Sonnenborg, T.O., Seifert, D. Hojberg, A.L. and Trolborg, L. (2012). Review of strategies for handling geological uncertainty in groundwater flow and transport modeling. *Advances in Water Resources*, **36**:36–50. doi: 10.1016/j.advwatres.2011.04.006.
- Reichard, E.G. and Evans, J.S (1989). Assessing the value of hydrogeologic information for risk-based remedial action decisions. *Water Resources Research*, **25**(7):1451–1460. doi:10.1029/WR025i007p01451.
- Reilly, T.E., Franke, O.L. and Bennett, G.D. (1987). The principle of superposition and its application in groundwater hydraulics. U.S. Government Printing Office, Washington DC, Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geological Survey, Book 3, Chapter B6, 28 pp. Release No 21, Washington DC.
- Renard, B., Kavetski, D. and Kuczera, G. (2009). Comment on «An integrated hydrologic Bayesian multimodel combination framework: Confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction» by Newsha, K. Ajami et al. *Water Resources Research*, **45**:W03603. doi: 10.1029/2007WR006538.
- Renard, B., Kavetski, D., Kuczera, G., Thyer, M. and Franks, S.W. (2010). Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors. *Water Resources Research*, **46**:W05521. doi:10.1029/2009WR008328.
- Renard, P. (2007). Stochastic Hydrogeology: What Professionals Really Need?. *Ground Water*, **45**(5):531–541. doi: 10.1111/j.1745-6584.2007.00340.x
- Riefler, R.G. and Ahlfeld, D.P. (1996). The Impact of Numerical Precision on the Solution of Confined and Unconfined Optimal Hydraulic Control Problems. *Hazardous Waste and Hazardous Materials*, **13**(2):167–176. doi:10.1089/hwm.1996.13.167.
- Robinson, P.C. and Hodgkinson, D.P. (1986). *Exact solutions for radio-nuclide transport in the presence of parameter uncertainty*. Report AERE R12125. Theoretical Physics Division, AERE, Harwell Laboratory, Oxfordshire.
- Robinson, S.M. (1972). A quadratically-convergent algorithm for general nonlinear programming problems. *Mathematical Programming*, **3**:145–156. doi: 10.1007/BF01584986.
- Rojas, R., Feyen, L., Batelaan, O. and Dassargues, A. (2010). On the value of conditioning data to reduce conceptual model uncertainty in groundwater modeling. *Water Resources Research*, **46**:W08520. doi:10.1029/2009WR008822.
- Rojas, R., Kahunde, S., Peeters, L., Batelaan, O., Feyen, L. and Dassargues, A. (2010). Application of a multimodel approach to account for conceptual model and scenario

- uncertainties in groundwater modeling. *Journal of Hydrology*, **394**(3-4): 416–435. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.09.016.
- Rojas, R., Feyen, L. and Dassargues, D. (2008). Conceptual model uncertainty in groundwater modeling: Combining generalized likelihood uncertainty estimation and Bayesian model averaging. *Water Resources Research*, **44**:W12418. doi:10.1029/2008WR006908.
- Rosen, J.B. and Kreuser J. (1972). *A gradient projection algorithm for nonlinear constraints*. In: Numerical methods for nonlinear optimization. F.A. Lootsma (ed.), Academic Press, London and New York.
- Rosenwald, G.W., Green, D.W. (1974). A method for determining the optimum location of wells in a reservoir using mixed-integer programming. *Society of Petroleum Engineers Journal*, **14**: 44–54. Doi: 10.2118/3981-PA
- Rouhani, S. (1985). Variance Reduction Analysis. *Water Resources Research*, **21**(6):837–846. doi:10.1029/WR021i006p00837.
- Sagar, B. (1978). Galerkin Finite Element Procedure for analyzing flow through random media, *Water Resources Research*, **14**(6):1035–1044. doi:10.1029/WR014i006p01035.
- Sagar, B. (1978). Galerkin Finite Element Procedure for analyzing flow through random media. *Water Resources Research*, **14**(6):1035–1044. doi:10.1029/WR014i006p01035.
- Sahinidis, V.N. (2004). Optimization under uncertainty: state-of-art and opportunities. *Computers and Chemical Engineering*, **28**:971-983. doi: 10.1016/j.compchemeng.2003.09.017.
- Semadeni-Davies, A. (1997). Monthly snowmelt modeling for long-scale climate change studies using the degree-day approach. *Ecological Modelling*, **101**(2-3):303-323. doi: 10.1016/S0304-3800(97)00054-9.
- Shiklomanov, I.A. and Rodda, J.C. (2003). *World Water Resources at the Beginning of the 21st Century*, UNESCO. International Hydrology Series. Cambridge University Press, Cambridge.
- Shvidler, M.I. (1962). Flow in heterogeneous media. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Mech. Zhidk. Gaza*, **3**:185 – 188. (in Russian)
- Shvidler, M.I. (1964). *Filtration Flows in Heterogeneous Media*. Consultants Bureau, New York.
- Sidiropoulos, P., Mylopoulos, N. and Loukas, A. (2013). Optimal Management of an Overexploited Aquifer under Climate Change: The Lake Karla Case. *Water Resources Management*, **27**(6):1635-1649. doi: 10.1007/s11269-012-0083-4.
- Singh, A. (2012). An overview of the optimization modeling applications. *Journal of Hydrology*, **466-467**:167-182. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.08.004.
- Singh, A., Burger, M.C. and Cirpka A.O. (2013). Optimized Sustainable Groundwater Extraction Management: General Approach and Application to the City of Lucknow, India. *Water Resources Management*, **27**(12):4349-4368. doi: 10.1007/s11269-013-0415-z.
- Singh, A., Mishra, S. and Ruskau, G. (2010). Model averaging techniques for quantifying conceptual model uncertainty. *Ground Water*, **48**(5):701–715. doi: 10.1111/j.1745-6584.2009.00642.x
- Sitar, N.J., Cawfield, D. and Der Kiureghian, A. (1987). First-order reliability approach to stochastic analysis of subsurface flow and contaminant transport. *Water Resources Research*, **23**(5):794–804. doi:10.1029/WR023i005p00794.
- Smith, L. and Freeze, R.A. 1979. Stochastic analysis of steady state groundwater flow in a bounded domain: 2. Two-dimensional simulations, *Water Resources Research*, **15**(6):1543–1559. doi:10.1029/WR015i006p01543.

- Smith, L. and Freeze, R.A. 1979. Stochastic analysis of steady state groundwater flow in a bounded domain: 1. One-dimensional simulations. *Water Resources Research*, **15**(3):521–528. doi:10.1029/WR015i003p00521.
- SOGREAH – GRENoble, (1974). *Μελέτη αναπτύξεως υπογείων υδάτων πεδιάδος Θεσσαλίας. Τελική έκθεση, R 11971*. Υπουργείο Γεωργίας, Διεύθυνση Γεωργ. Αναπτ. & YEB, Αθήνα.
- Srivastana, R.M. (1994). An overview of stochastic methods for reservoir characterization, in Yarush, J.M. and Chambers, R.L., eds. *Stochastic Modeling and Geostatistics: Principles, Methods and Case Studies*. (AaPG Computer Applications in Geology, No 3). American Association of Petroleum Geologists. New York.
- Stewart, R. A. and Griffith, R.E. (1961). A nonlinear programming technique for the optimization of continuous processing systems. *Management Science*, **7**(4): 379–392. doi: 10.1287/mnsc.7.4.379.
- Tang, D.H. and Pinder, F.G. (1977). Simulation of groundwater flow and mass transport under uncertainty. *Advances in Water Resources*, **1**(1):25-30. doi: 10.1016/0309-1708(77)90005-7.
- Tang, D.H. and Pinder, G.F. (1977). Simulation of groundwater flow and mass transport under uncertainty. *Advances in Water Resources*, **1**(1):25-30. doi: 10.1016/0309-1708(77)90005-7.
- Tartakovsky, M.D. (2013). Assessment and management of risk in subsurface hydrology: A review and perspective. *Advances in Water Resources*, **51**:247-260. doi: 10.1016/j.advwatres.2012.04.007.
- Theis, C.V. (1935). The relation between lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Eos Trans. AGU*, 519-529.
- Theodossiou, N. (2004). Application of non-linear simulation and optimization models in groundwater aquifer management. *Water Resources Management*, **18**(2):125-141. doi: 10.1023/B:WARM.0000024723.17916.64.
- Tolikas, D., Latinopoulos, P., Tolikas, J. and Ganoulis, J. (1983). Optimum management of a regional confined aquifer. *Advances in Water Resources*, **6**(2):66-70. doi: 10.1016/0309-1708(83)90042-8.
- Townley, L.R. and Wilson, J. L. (1985). Computationally Efficient Algorithms for Parameter Estimation and Uncertainty Propagation in Numerical Models of Groundwater Flow. *Water Resources Research*, **21**(12):1851–1860. doi:10.1029/WR021i012p01851.
- Troldborg, L., Refsgaard, J.C, Jensen, K.H. and Engesgaard, P. (2007). The importance of alternative conceptual models for simulation of concentrations in a multi-aquifer system. *Hydrogeology Journal*, **15**(5):843–860. doi: 10.1007/s10040-007-0192-y.
- USDA Soil Conservation Service, (1970). *Irrigation Water Requirements*. Technical
- Van Asselt M. (2000). *Perspectives on Uncertainty and Risk: The PRIMA Approach to Decision Support*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Van Everdingen, A.F. and Hurst, W. (1949). The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, **186**:305-324.
- Vandewiele, G.L. and Win, N.L. (1998). Monthly water balance models for 55 basins in 10 Countries. *Hydrological Sciences Journal*, **43**(5):687-699. doi: 10.1080/02626669809492166.
- Wagner, B. J., and S. M. Gorelick (1987), Optimal groundwater quality management under parameter uncertainty. *Water Resources Research*, **23**(7):1162–1174, doi:10.1029/WR023i007p01162.
- Wagner, B. (1999). Evaluating Data Worth for Ground-Water Management under Uncertainty. *Water Resources Planning and Management*, **125**(5):281–288. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1999)125:5(281).

- Wagner, B.J. and Gorelick, S.M. (1989). Reliable aquifer remediation in the presence of spatially variable hydraulic conductivity: From data to design. *Water Resources Research*, **25**(10):2221-2225. doi: 10.1029/WR025i010p02211.
- Wagner, J. M., Shamir, U. and Nemati, H. R. (1992). Groundwater quality management under uncertainty: stochastic programming approaches and the value of information. *Water Resources Research*, **28**(5):1233-1246. doi:10.1029/92WR00038.
- Wagner, J.M., Shamir, U. and Nemati, H.R. (1992). Groundwater quality management under uncertainty: stochastic programming approaches and the value of information. *Water Resources Research*, **28**(5):1233-1246. doi:10.1029/92WR00038.
- Wagner, J.W. (1995). Recent advances in simulation-optimization groundwater management modeling. U.S. National Report to International Union of Geodesy and Geophysics 1991-1994, Reviews of Geophysics, Supplement, 1021-1028 pp.
- Warren, J .E. and Price, H.S. (1961). Flow in heterogeneous porous media, *SPE Journal*, **1**(3):153-169. doi: 10.2118/1579-G
- WCED (World Commission on Environment and Development) (1987). *Our Common Future* (the Brundtland report), Oxford University Press, Oxford.
- Willis, R. (1983). An unified approach to regional groundwater management in groundwater hydraulics. *Water resources monograph series*, A.G.U., (eds) Rosenshein, J.S. and Bennett, G.D. Washington, DC.
- Willis, R. and Yeh, W.W.G. (1987). *Groundwater systems planning and management*. Prentice Hall, Englewood Cliffs N.J.
- Wolfe, P. (1962). *The reduced gradient method*. RAND Corporation.
- Wu, J.C and Zeng X.K. (2013). Review of the uncertainty analysis of groundwater numerical simulation. *Chinese Science Bulletin*, **58**(25):3044-3052. doi: 10.1007/s11434-013-5950-8.
- Wu, J.C., Lu, L. and Tang, T. (2011). Bayesian Analysis for Uncertainty and Risk in a Groundwater Numerical Model's Predictions. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, **17**(6):1310-1331. doi: 10.1080/10807039.2011.618419.
- Ye, M., Pohlmann, K.F., Chapman, J.B., Pohll, G.M. and Reeves, D.M. (2010). A Model-Averaging Method for Assessing Groundwater Conceptual Model Uncertainty. *Ground Water*, **48**(5):716-728. doi: 10.1111/j.1745-6584.2009.00633.x
- Yen, B.C., Cheng, S.T and Melching, C.S. (1986). *Stochastic and Risk Analysis in Hydraulic Engineering*. Littleton: Water Resources Publications. USA.
- Yokota, F. and Thompson, M.K. (2004). Value of information literature analysis: A review of applications in health risk management. *Medical Decision Making*, **24**(3):287-298. doi: 10.1177/0272989X04263157.
- Zadeh, L.A. (2005). Toward a generalized theory of uncertainty (GTU)—an outline. *Information Science*, **172**(1-2):1-40. doi: 10.1016/j.ins.2005.01.017.
- Zalidis, G, and Gerakis, A. (1999). Research Evaluating Sustainability of Watershed Resources Management through Wetland Functional Analysis. *Environmental Management*, **24**(2):193-207. Doi: 10.1007/s002679900226.
- Zeng, X., Wang, D., Wu, J. and Chen, X. (2013). Reliability Analysis of the Groundwater Conceptual Model. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, **19**(2):515-525. doi: 10.1080/10807039.2012.713822.
- Zeng, X.K., Wang, D.D. and Wu, J.C. (2012). Sensitivity analysis of the probability distribution of groundwater level series based on information entropy. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **26**(3):345-265. doi: 10.1007/s00477-012-0556-2.
- Γκανούλης, Ι. (2002). Για μια βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων στην Ελλάδα. Σημερινή κατάσταση και προοπτικές. *Υδροοικονομία*, **4**:28-31.

- Δημόπουλος, Γ. (1998). Διαχείριση νερών. Πρακτικά 1^{ου} Συνεδρίου «Αναπτυξιακή Προοπτική Θάσου», Πρίνος 4-9 Σεπτεμβρίου.
- Ευαγγελόπουλος, Α. (2003). Ποσοτική και ποιοτική κατάσταση υπόγειου υδάτινου δυναμικού λεκάνης ανατολικής Θεσσαλίας. 3^ο Συνέδριο Ανάπτυξης της Θεσσαλίας, ΤΕΕ Κεντρικής και Δυτικής Θεσσαλίας, Λάρισα.
- Καλλέργης, Γ. (2001). *Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία*. Γ. Έκδοση ΤΕΕ Ελλάδος. Αθήνα.
- Καμπράγκου, Ε. (2006). *Integrated Water Resources Management. Application of Balanced Score Card to Nestos basin*. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Κουτσογιάννης, Δ. (1997). *Στατιστική Υδρολογία*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κωνσταντινίδης, Δ. και Περγαλιώτης, Π. (1984). *Ανάπτυξη υπόγειων υδάτων Θεσσαλίας. Μαθηματικά Μοντέλα. Αναρίθμηση των μοντέλων υπόγειων υδροφορέων*. Υπουργείο Γεωργίας, Αθήνα.
- Λουκάς, Α., Μήτσιου Π. και Βασιλειάδης, Λ. (2006). Κατανεμημένη Μηνιαία Υδρολογική Προσομοίωση με Χρήση Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών. 10^ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (Ε.Υ.Ε.) «Διαχείριση Υδατικών Πόρων και Προστασία Περιβάλλοντος - Σύγχρονες Θεωρήσεις, Προβλήματα και Προοπτικές», 19-21 Οκτωβρίου, Ξάνθη.
- Λουκάς, Α., Μυλόπουλος, Ν. και Αργύρης, Α. (2005α). Διαχείριση των Έργων Μεταφοράς και Αποθήκευσης Νερού από τον Άνω Ρου του Ποταμού Αχελώου. 5^ο Εθνικό Συνέδριο της ΕΕΔΥΠ “Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων με Βάση τη Λεκάνη Απορροής”, 6-9 Απριλίου, Ξάνθη.
- Λουκάς, Α., Μυλόπουλος, Ν., Μυλόπουλος, Γ. και Μουστάκα, Ε. (2005β). Προσομοίωση και Αποτίμηση της Λειτουργίας του Ταμιευτήρα της Κάρλας. 5^ο Εθνικό Συνέδριο της ΕΕΔΥΠ “Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων με Βάση τη Λεκάνη Απορροής”, 6-9 Απριλίου, Ξάνθη, 2005.
- Μαυρονικολάου, Κ. και Καρκάς, Δ. (2004). *Γεωργοτεχνική – Γεωργοοικονομική μελέτη Κάρλας*. ΥΠΕΧΩΔΕ, Αθήνα.
- Μήτσιου, Π. (2008). *Μελέτη και οικονομική αποτίμηση της διαχείρισης υπόγειου υδροφορέα έναντι πιθανής ρύπανσης*. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Π.Μ.Σ. Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
- Μπακαλιάνος, Δ. (2010). *Βιώσιμος σχεδιασμός γεωργικής παραγωγής με τη χρήση της μεθόδου Emergy για σενάρια διαχείρισης υδατικών πόρων και κλιματικής αλλαγής. Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κάρλας*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- Μπεζές, Κ. (2004). *Μελέτη έργων ενίσχυσης της ύδρευσης της μείζονος περιοχής Βόλου – Υδρογεωλογική Μελέτη*, ΥΠΕΧΩΔΕ, Αθήνα.
- Μυλόπουλος, Ι. (2000). Διαχείριση της ζήτησης και κοστολόγησης του νερού. Διαθέσιμο στην url: <http://www.waterinfo.gr/eedyp/papers/IMylopoulos.html>
- Ξανθόπουλος, Θ. (1996). Διαχείριση υδατικών πόρων: θεωρητικές ελπίδες, ρεαλιστική προσέγγιση. Πρακτικά Συνεδρίου με θέμα «Διαχείριση υδατικών πόρων», Τ.Ε.Ε. - Τμήμα Κεντρικής και Δυτικής Θεσσαλίας, Λάρισα 13-16 Νοεμβρίου, Τόμος Ι.
- Παληκαρίδου, Α. (1998). *Οι παλαιοακτές της τέως λίμνης Κάρλας*. Διατριβή ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Παπαμιχαήλ, Δ. (2001). *Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων*. Εκδόσεις Γιαχούδη, Αθήνα.

- Σιδηρόπουλος, Π. (2007). *Στοχαστική Προσομοίωση του Υπόγειου Υδροφορέα της Λίμνης Κάρλας*. Μεταπτυχιακή Εργασία Ειδίκευσης, Π.Μ.Σ. Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- Τολίκας, Δ. (1987). *Διαχείριση Υδατικών Πόρων*. Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Τσακίρης, Γ. (2004). Σημειώσεις μαθήματος «Διαχείριση υδατικών πόρων». Ε.Π.Μ. Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων».
- ΥΠ.Ε.Κ.Α. – Ειδική Γραμματεία Υδάτων (2013). *Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας*, Αθήνα. Διαθέσιμο στην url: http://dl.dropboxusercontent.com/u/50959275/RBMP_GR08.pdf
- Ψιλοβίκος, Α. (1999). *Βέλτιστη διαχείριση υπόγειων υδροφορέων: συγκριτική αξιολόγηση με τις μεθόδους γραμμικού και μη γραμμικού προγραμματισμού*. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.